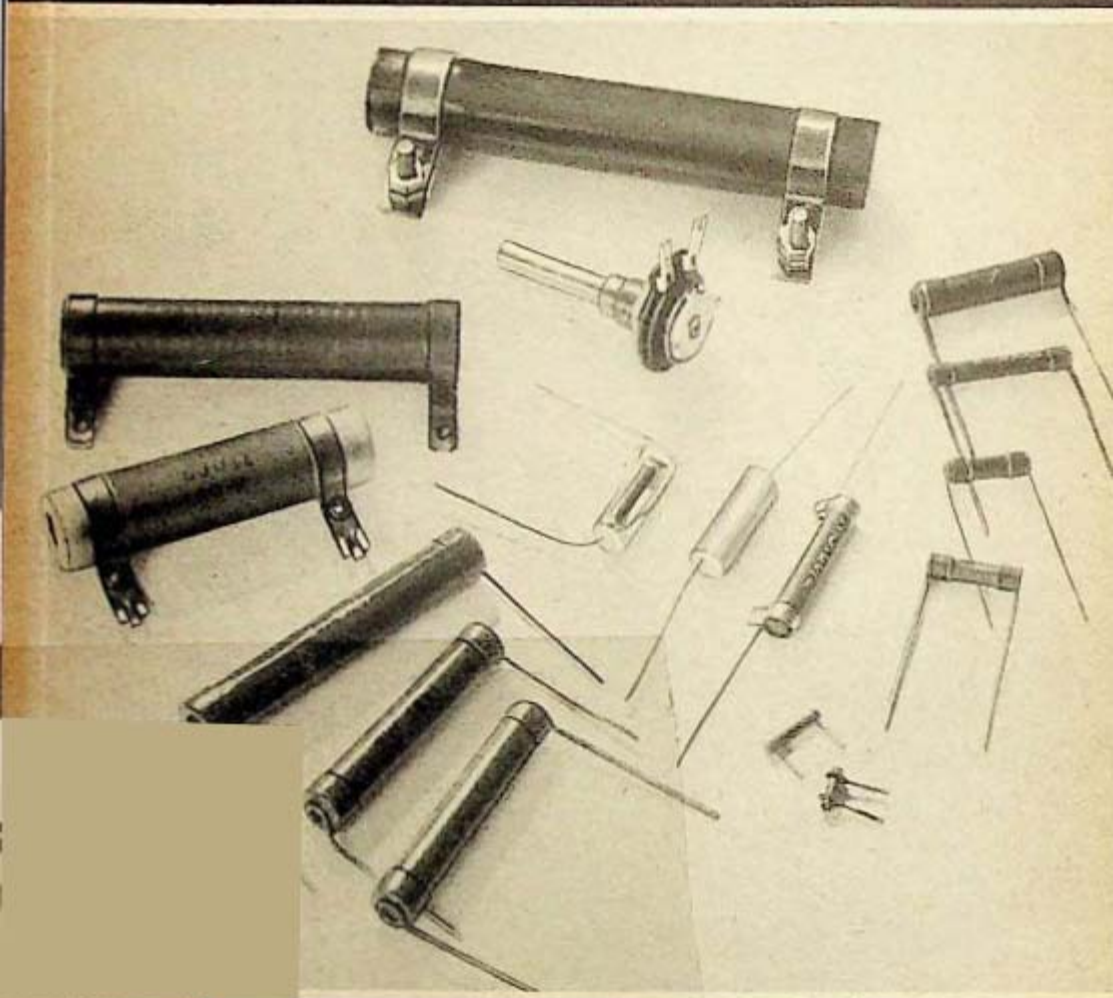
radio PRAKTIKER bücherei

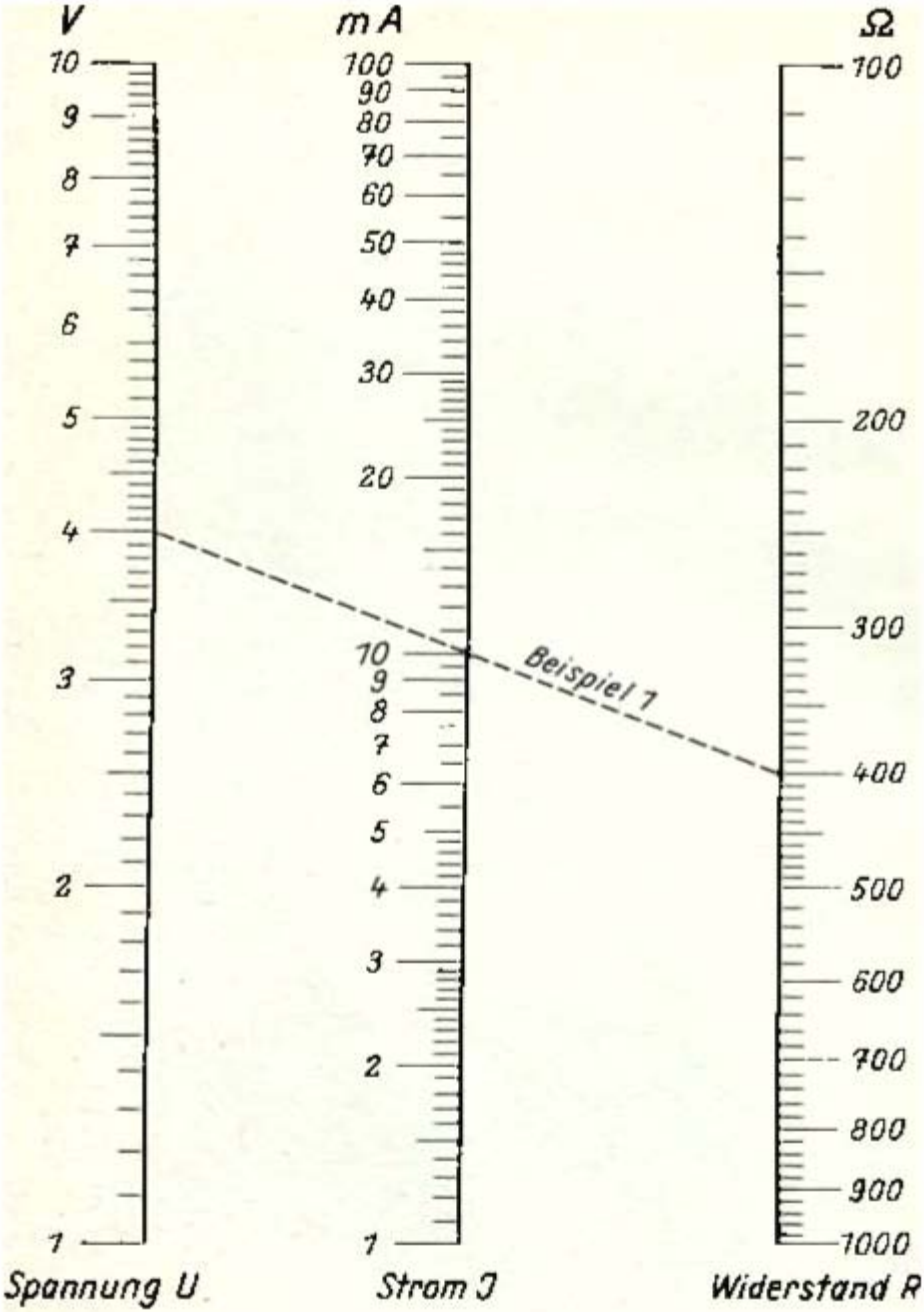
DIPL.-ING. GEORG HOFFMEISTER

Widerstandskunde für Radio-Praktiker



10

FRANZIS-VERLAG · MÜNCHEN



Nomogramm 1. Das Ohmsche Gesetz

Widerstandskunde für Radio-Praktiker

Die Festwiderstände in Berechnung und Anwendung

Von

DIPL.-ING. GEORG HOFFMEISTER

Mit 5 Bildern, 2 Nomogrammen und 6 großen Zahlentafeln

4. Auflage

FRANZIS-VERLAG MÜNCHEN

Verlag der G. Franz'schen Buchdruckerei G. Emil Mayer

Heft 16 der RADIO-PRAKTIKER-BÜCHEREI

Inhalt

I. Grundlagen ... 4
1. Die Einheit des Widerstandes ... 4
2. Der Einfluß der Strom-Wärme ... 7
3. Der Einfluß der Temperatur ... 11
4. Der Einfluß von Zeit und Feuchtigkeit ... 15

II. Runddrähte aus Leiter- und Widerstandswerkstoffen ... 16
1. Leiterwerkstoffe ... 16
2. Widerstandswerkstoffe ... 19

III. Der Drahtwiderstand ... 32
1. Die Belastbarkeit der Drahtwiderstände ... 32
2. Die Genauigkeit der Drahtwiderstände ... 39
3. Induktions- und kapazitätsarme Wicklungsarten ... 42

IV. Der Schichtwiderstand ... 44
1. Arten und Aufbau der Schichtwiderstände ... 44
2. Die Belastbarkeit der Schichtwiderstände ... 46
3. Die Genauigkeit der Schichtwiderstände ... 48
4. Verhalten der Schichtwiderstände im Hf-Kreis ... 52
5. Das Eigengeräusch der Schichtwiderstände ... 59

V. Kennzeichnung fester Widerstände für die Nachrichtentechnik ... 61
1. Kennzeichnung durch Stempelaufdruck ... 61
2. Farbkennzeichnung nach DIN 41 429 ... 62
3. Zeichnungssinnbilder in Schaltplänen ... 64

Das Titelbild zeigt Festwiderstände verschiedenster Größe
Aufnahme: C. Stumpf

1961

Sämtliche Rechte — besonders das Übersetzungsrecht — an Text und Bildern vorbehalten. Fotomechanische Vervielfältigung nur mit Genehmigung des Verlages. Jeder Nachdruck, auch auszugsweise, und jede Wiedergabe der Bilder, auch in verändertem Zustand, sind verboten.

Druck: G. Franz'sche Buchdruckerei G. Emil Mayer, München 37, Karlstraße 35
Printed in Germany

Vorwort

Der Widerstand zählt in der Radiotechnik und Elektronik zu den wichtigsten Schaltelementen. Das vorliegende Bändchen der Radio-Praktiker-Bücherei hat es sich daher zur Aufgabe gemacht, den Funkpraktiker über Arten und Eigenschaften der Widerstände zu unterrichten, ihn weiterhin bei der Berechnung und Anfertigung und bei der praktischen Anwendung von Widerständen zu beraten und ihm hierfür das erforderliche Zahlenmaterial zur Verfügung zu stellen.

Neben allgemeinen Grundlagen und dem Einfluß von Wärme und Temperatur auf den Widerstand, dessen Verständnis für die Belastbarkeit und Genauigkeit der Widerstände von Bedeutung ist, wurden Aufbau und Eigenschaften von Draht- und Schichtwiderständen eingehend behandelt, wobei auch auf das Verhalten des Hochohmwiderstandes im Hf-Kreis eingegangen wurde. Angefügt wurde schließlich ein Abschnitt über die Kennzeichnung von Widerständen im Nachrichtengerätebau. Zum leichteren Verständnis enthalten die einzelnen Abschnitte zahlreiche Rechenbeispiele. Soweit DIN-Vorschriften zu berücksichtigen waren, sind sie in den Text hinein verarbeitet worden. Schließlich bieten Tafeln mit Materialwerten, Nomogramme und Deratingkurven dem Funkpraktiker die notwendigen Rechenunterlagen und die stets willkommene Hilfe bei der Beurteilung der praktischen Anwendung von Widerständen.

Wenn dieses Büchlein dazu beiträgt, das Verständnis für die Widerstandstechnik zu fördern mit dem Ziel, für jeden Zweck den richtigen Widerstand zu finden, so hat es seine Aufgabe erfüllt.

Vorwort zur 4. Auflage

Die seit Erscheinen der letzten Auflage in der Widerstandstechnik erzielten Fortschritte, insbesondere in der Weiterentwicklung von hochbelastbaren Kristallkohle-Schichtwiderständen und von Höchstohm- und Hochspannungs-Kolloidkohle-Schichtwiderständen, weiterhin von Metallschichtwiderständen hoher Genauigkeit und zeitlicher Konstanz, machten eine Neubearbeitung dieses Heftes notwendig. Auch hierbei hat sich der Verfasser wieder von dem Gedanken leiten lassen, das Gebiet der Widerstandstechnik vorwiegend vom Standpunkt der praktischen Anwendung der Widerstände zu behandeln. Gleichzeitig ergab sich die Möglichkeit, die von Funkpraktikern an den Verfasser herangetragenen Wünsche zu berücksichtigen. Auf den Abschnitt „Widerstandsschaltungen" wurde zugunsten des neuen Abschnittes „Runddrähte aus Leiter- und Widerstandswerkstoffen" als bekannt verzichtet. Der Verfasser dankt den Firmen Steatit-Magnesia AG, Porz, Rosenthal-Isolatoren GmbH, Selb, Resista, Landshut, und Monette, Marburg, für die Überlassung wertvoller Unterlagen.

Beuel a. Rhein — Georg Hoffmeister

I. Grundlagen

1. Die Einheit des Widerstandes

Die Einheit des elektrischen Leitungswiderstandes R ist das Ohm (Ω). Sie wird durch den Widerstand einer Quecksilbersäule von durchweg gleichem Querschnitt, 106,300 cm Länge und 14,4521 g Masse bei 0° C dargestellt und mit internationalem Ohm (Ω_{int}) bezeichnet. Vom 1. Januar 1948 ab ist jedoch das System der internationalen elektrischen Einheiten durch das System der (absoluten) praktischen elektrischen Einheiten (Ω) ersetzt worden (DIN 1357). Danach ist

$$1\ \Omega_{int} = 1{,}000\,49\ \Omega \quad \text{und}$$
$$1\ \Omega = 0{,}999\,51\ \Omega_{int}$$

Die nach dem praktischen Ohm hergestellten Widerstände werden also um etwa 0,05 % größer als die nach dem internationalen Ohm ausgeführten, ein Unterschied, der für Messungen in der Praxis jedoch ohne Einfluß ist. Als Vielfache des Ohms sind in Anwendung

1 Kiloohm (kΩ) = 10^3 Ohm
1 Megohm (MΩ) = 10^6 Ohm
1 Gigaohm (GΩ) = 10^9 Ohm
1 Teraohm (TΩ) = 10^{12} Ohm

Der Widerstand eines Körpers nimmt mit wachsender Länge l zu und mit wachsendem Querschnitt F ab. In Verbindung mit dem Ohmschen Gesetz errechnet sich daher der Leitungswiderstand aus

$$R = \frac{\text{Spannung } U\ [V, mV]}{\text{Stromstärke } I\ [A, mA]} = \frac{l \cdot \varrho}{F}\ [\Omega] \qquad (1)$$

ϱ ist in Gleichung (1) der spezifische elektrische Widerstand des Widerstandsmaterials, d. i. sein Widerstand bezogen auf die Einheit von F und l. Für Widerstandskörper mit großer Längenausdehnung und geringem Querschnitt (Drahtwiderstände) wird ϱ bezogen auf $F = 1\ mm^2$ und $l = 1$ m und erhält somit die Dimension $\Omega mm^2/m$. Bei Körpern mit geringer Längenausdehnung (z. B. Isolierstoffen) wird ϱ auch bezogen auf $F = 1\ cm^2$ und $l = 1$ cm, so daß die Dimension für ϱ in diesem Falle $\Omega cm^2/cm = \Omega cm$ (Ohmzentimeter) wird. Beide stehen in folgender gegenseitiger Beziehung

$$1\ \Omega mm^2/m = 10^{-4}\ \Omega cm$$

Als Teile und Vielfache des Ωcm sind im Gebrauch

das Mikroohmzentimeter (μΩcm)	$= 10^{-6}$
das Ohmmeter (Ωm)	$= 10^{2}$ Ωcm
das Megohmzentimeter (MΩcm)	$= 10^{6}$ Ωcm

Mit Gleichung (1) läßt sich ϱ auch ausdrücken durch

$$\varrho = R \cdot \frac{F}{l} = \frac{U \cdot F}{I \cdot l} = \frac{U/l}{I/F} = \frac{E}{S} \quad [\Omega mm^2/m] \qquad (2)$$

Werden hierin F und l in cm eingesetzt, so ist U/l der Spannungsabfall auf den cm, also die elektrische Feldstärke E, und I/F die Stromstärke pro cm^2, also die Stromdichte S.

Der elektrische Leitwert G ist der dem Widerstand R reziproke Wert, G = 1/R, und wird in Siemens (S) gemessen, wobei 1 S = 1/Ω. Entsprechend bezeichnet man den reziproken Wert von ϱ mit elektrischer Leitfähigkeit oder mit spezifischem elektrischem Leitwert

$$\varkappa = \frac{1}{\varrho} = \frac{S}{E} \quad [Sm/mm^2] \qquad (3)$$

ϰ hat nach den obigen Ausführungen entweder die Dimension $m/\Omega mm^2 = Sm/mm^2$ oder $1/\Omega cm = S/cm$. Die erstere läßt erkennen, wieviel m eines bestimmten Stoffes von 1 mm^2 Querschnitt den Widerstand 1 Ω ergeben (z. B. für Kupfer ist $\varkappa = 57\ Sm/mm^2$ und damit diese Länge 57 m). Wird in Gleichung (1) an Stelle von ϱ der spezifische Leitwert ϰ gesetzt, so erhält sie folgende Form

$$R = \frac{l}{\varkappa \cdot F} \quad [\Omega] \qquad (4)$$

Die Festlegung, daß die Einheit des Widerstandes 1 Ω dann gegeben ist, wenn in diesem Widerstand die Spannung 1 V die Stromstärke 1 A hervorruft, ist keine in der Meßpraxis unmittelbar anwendbare Größe, da das Volt nach 1 V = 1 Ω · 1 A eine abgeleitete Einheit und das Ampere eine Einheit ist, die nicht verkörpert aufbewahrt werden kann. Es werden daher in der Praxis die Messungen stets auf geeichte Normalwiderstände und Normalelemente zurückgeführt. Als Normalwiderstand dient nach internationaler Übereinkunft die eingangs definierte Widerstandseinheit und als Normalelement das Westonsche Kadmiumelement, dessen EMK nach dem Ohmschen Gesetz durch das internationale Ohm und internationale

Ampere bestimmbar ist und nach eingehenden Messungen mit 1,018 30 V_{int} bei 20° C angenommen wird.

Beispiel 1: Gegeben U = 4 V und I = 10 mA, gesucht R.

Die Verbindungslinie 4 V...10 mA schneidet im Nomogramm 1 die Widerstandsleiter R bei 400 Ω. Umgekehrt läßt sich natürlich auch eine der beiden anderen Größen U oder I ermitteln, wenn die beiden übrigen (I und R oder U und R) bekannt sind. Für die Erweiterung des Ablesebereiches ist zu beachten, daß eine Veränderung des Maßstabes auf der Spannungsleiter eine gleichsinnige Änderung des Maßstabes auf der Widerstandsleiter bedingt (z. B. 40 V...10 mA ergeben 4000 Ω), während eine Veränderung des Maßstabes auf der Stromleiter eine gegensinnige Änderung des Maßstabes auf der Widerstandsleiter erforderlich macht (z. B. 4 V...100 mA ergeben 40 Ω).

Beispiel 2: Wie groß ist der Widerstandswert R eines Rundkupferdrahtes von 1.40 mm Durchmesser, d. i. mit einem Querschnitt F = 1,539 mm², und l = 50 m Länge?

Nach Abschnitt II ist $\varrho = 0{,}017\,54\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ und $\varkappa = 57\ \text{Sm/mm}^2$ für Kupfer und damit der gesuchte Widerstand nach Gleichung (1) oder (3)

$$R = \frac{l \cdot \varrho}{F} = \frac{50 \cdot 0{,}01754}{1{,}539} = \frac{l}{\varkappa \cdot F} = \frac{50}{57 \cdot 1{,}539} = 0{,}57\ \Omega$$

Die genormten und daher zu bevorzugenden Widerstandswerte entsprechen nach DIN 323 folgender abgerundeten dezimalgeometrischen Reihe R 10 (Stufenfaktor $\sqrt[20]{10}$):

Ω	1	1,25	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8
	10	12,5	16	20	25	30	40	50	60	80
	100	125	160	200	250	300	400	500	600	800
kΩ	1	1,25	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8
	10	12,5	16	20	25	30	40	50	60	80
	100	125	160	200	250	300	400	500	600	800
MΩ	1	1,25	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8
	10			20		30		50		

Drahtwiderstände liegen im Bereich 1 Ω...100 kΩ und Schichtwiderstände im Bereich 10 Ω...10 MΩ und darüber.

2. Der Einfluß der Strom-Wärme

Jeder vom Strom durchflossene Leiter erwärmt sich. Die in einem Widerstand von R [Ω] in der Zeit t [s] durch den Strom I [A] entstehende Wärmemenge ist nach dem Jouleschen Gesetz

$$Q = 0{,}239 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad [\text{cal}] \tag{5}$$

Hierin dient der Faktor 0,239 zur Umrechnung von elektrischer Energie [W] auf Wärmeenergie [cal]. Es ist nämlich in Gleichung (5)

$I^2 \cdot R \cdot t = A =$ elektrische Arbeit [Ws] oder [J] und

$I^2 \cdot R = N =$ elektrische Stromwärmeleistung [W], d. i. die in 1 s geleistete Arbeit.

Unter dem Einfluß dieser im Widerstand entwickelten Wärme steigt seine Temperatur ϑ an. Dieser Temperaturanstieg ist jedoch der Erwärmungszeit t nicht proportional, da er durch die mit wachsender Temperatur ebenfalls ansteigenden Wärmeverluste beeinflußt wird. Die Kühlung des Widerstandes erfolgt nämlich

1. durch die vorbeistreichende Luftströmung (Konvektion),
2. durch Wärmeabstrahlung (Strahlungskühlung) und
3. durch Wärmeleitung über die Anschlußarmaturen.

Die Kühlung zu 3. tritt jedoch nur bei sehr kleinen Widerstandskörpern merklich in Erscheinung. Im Vordergrund steht daher die Kühlung nach 1. und 2., die beide im wesentlichen von der Oberfläche des Widerstandes und der Umgebungstemperatur abhängen.

Je größer die in einer bestimmten Zeit entwickelte Wärmemenge gegenüber den in der gleichen Zeit entstandenen Wärmeverlusten ist, desto höher steigt auch die Temperatur des Widerstandes. Sie steigt so lange, bis die abgegebene Wärmemenge gleich der erzeugten wird, und erreicht mit diesem Gleichgewichtszustand einen maximalen Wert ϑ_{max}. Der Vorgang ist analog dem des Aufladens eines Kondensators über einen Widerstand. Den Verlauf der Temperatur ϑ in Abhängigkeit von der Zeit t zeigt daher auch folgende analoge Gleichung

$$\vartheta = \vartheta_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad [^\circ C] \tag{6}$$

Hierin ist T die thermische Zeitkonstante des Widerstandes [s] und gleich dem Verhältnis Wärmekapazität A' [Ws/°C] zu Wärmeabgabefähigkeit N' [W/°C] des Widerstandes. Es ist weiterhin $A' = c \cdot G$ (c = spezifische Wärme des Widerstandskörpers [Ws/g, °C], wobei 1 cal = 4,19 Ws; G = Gewicht des Widerstandskörpers [g] und $N' = \mu \cdot F$ (μ = Wärmeabgabekoeffizient [W/cm², °C]; F = abkühlende Oberfläche [cm²]). Da weiterhin $\vartheta_{max} = N/N'$, so wird die zulässige Belastung N_z eines Widerstandes (Grenzdauerlast), wenn man für den Widerstand eine bestimmte Grenztemperatur ϑ_{max} festlegt

$$N_z = I \cdot U = I^2 \cdot R = U^2/R = N' \cdot \vartheta_{max} = \mu \cdot F \cdot \vartheta_{max} \text{ [W]} \quad (7\,a)$$

Besitzt die Umgebung bereits eine Temperatur ϑ_0, so geht Gleichung (7 a) mit der Übertemperatur $\vartheta_{max} - \vartheta_0$ über in

$$N_z = \mu \cdot F \cdot (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \text{ [W]} \quad (7\,b)$$

Beispiel 3: Nach DIN 41 400 beträgt für Schichtwiderstände die zugelassene höchste Oberflächentemperatur bei Dauerbetrieb mit Nennlast $\vartheta_{max} = 110°$ C bezogen auf die Umgebungstemperatur $\vartheta_0 = 20°$ C. Ist $F = 6$ cm² und $\mu = 2 \cdot 10^{-3}$ W/cm², °C, so wird

$$N_z = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot (110 - 20) \approx 1 \text{ W}$$

Im allgemeinen ist die zulässige Betriebslast N_z gleich der Nennlast N_n. Sie kann höher liegen bei günstigerer Wärmeabfuhr N', z. B. künstlicher Kühlung oder Schornsteinwirkung mit einem höheren Wert für μ. Sie muß niedriger sein bei ungünstigen Betriebsbedingungen, z. B. höherer Umgebungstemperatur ϑ_u, hervorgerufen durch gedrängten Einbau oder benachbarte, wärmeabgebende Bauteile. Bei gleicher Wattbelastung verringert sich dann die Übertemperatur $\vartheta_{max} - \vartheta_u$. Belastet man einen Schichtwiderstand nach DIN 41 403 mit $N_n = 1$ W und steigt hierbei seine Oberflächentemperatur um $\vartheta_{max} - \vartheta_u = 55°$ C an, so darf im Hinblick auf die zugelassene höchste Oberflächentemperatur von $\vartheta_{max} = 110°$ C die Umgebungstemperatur $\vartheta_u = \vartheta_{max} - 55 = 110 - 55 = 55°$ C nicht überschreiten. Bei höherer Umgebungstemperatur darf der Widerstand nur noch mit einem bestimmten Teil seiner Nennlast betrieben werden. Die Deratingkurve 1 des Bildes 1 gibt in diesem Falle die zulässige Belastbarkeit N_z in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur ϑ_u an.

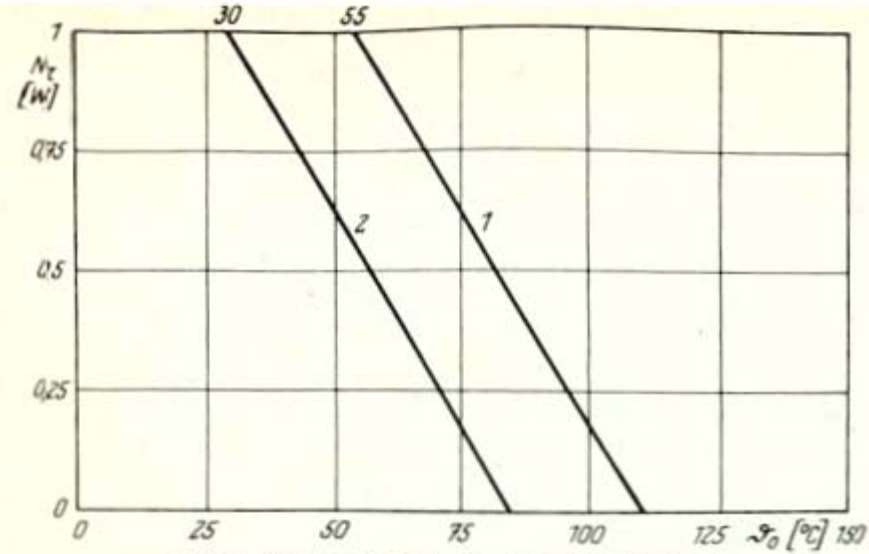


Bild 1 Deratingkurven für Schichtwiderstände

Wird über den Widerstand ein Isolierschlauch gezogen, der eine Grenztemperatur von $\vartheta_{max} = 85°$ C verträgt, so darf die Umgebungstemperatur den Wert $\vartheta_0 = 85 - 55 = 30°$ C nicht übersteigen. Bei $\vartheta_0 = 45°$ C beträgt die zulässige Belastung nur noch $N_z = 0{,}75$ W (Kurve 2 des Bildes 1).

Es ist auch möglich und üblich, die zulässige Belastung N_z in % der Nennlast N_n in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur ϑ_0 darzustellen (Bild 2). Wird ein offen gewickelter oder lackierter Drahtwiderstand nach DIN 41 412 mit $N_n = 1$ W belastet, so steigt seine Oberflächentemperatur um $\vartheta_{max} - \vartheta_0 = 70°$ C an. Mit der nach DIN 41 410 für offen gewickelte und lackierte Drahtwiderstände zugelassenen höchsten Oberflächentemperatur von 170° C wird die zulässige Umgebungstemperatur $\vartheta_0 = 170 - 70 = 100°$ C. Bei höherer Umgebungstemperatur darf der Widerstand nur noch mit einem bestimmten Prozentsatz seiner Nennlast betrieben werden, bei $\vartheta_0 = 120°$ C z. B. nur noch mit 70 % von 1 W, d. i. 0,7 W.

Für die hochbelastbaren zementierten und glasierten Drahtwiderstände sind Deratingkurven des Bildes 3 in Gebrauch. Die Schnittpunkte der Linien 1...5 mit der ϑ_0-Achse entsprechen den höchstzulässigen Oberflächentemperaturen bestimmter Belastungen N_n, bezogen auf $\vartheta_0 = 25°$ C. So zeigt z. B. Kurve 5, daß ein glasierter Widerstand mit einer zugelassenen höch-

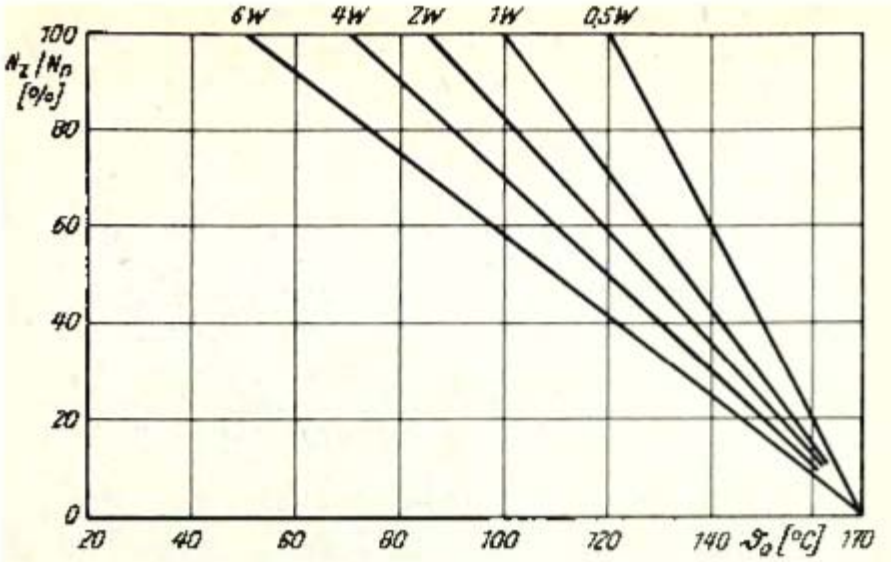


Bild 2. Deratingkurven für offen gewickelte und lackierte Drahtwiderstände

sten Oberflächentemperatur von $\vartheta_{max} = 550^0$ C, der bei $\vartheta_o = 25^0$ C z. B. $N_n = 40$ W verträgt, bei $\vartheta_o = 300^0$ C nur noch mit 50 %, also mit $N_z = 20$ W belastet werden darf.

Ist auf diese Weise die zulässige Belastung N_z eines Widerstandes ermittelt worden, so bestimmt sich seine zulässige

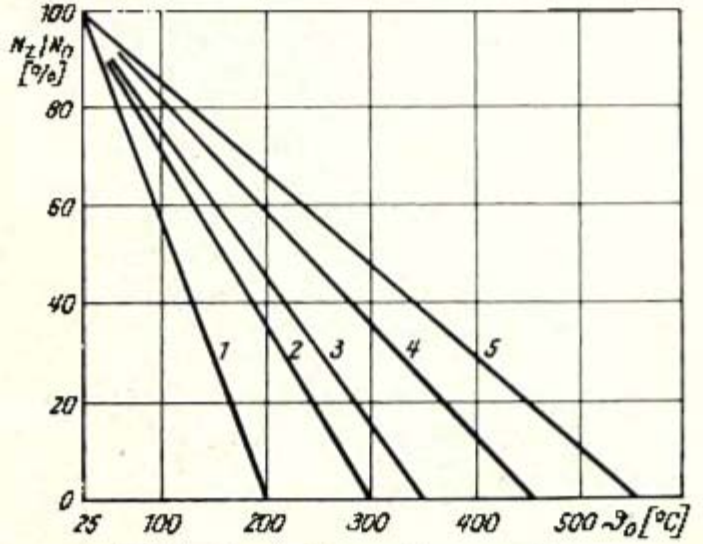


Bild 3. Deratingkurven für zementierte und glasierte Drahtwiderstände

Strom- und Spannungsbelastung mit Hilfe von Gleichung (7 a) aus

$$I_z = \sqrt{\frac{N_z}{R}} \text{ [A]}; \qquad U_z = \sqrt{N_z \cdot R} \text{ [V]} \qquad (8\,a, b)$$

Hierbei ist jedoch zu beachten, daß Widerstände nicht nur eine Gleichstrom- oder Wechselstrombelastung, sondern oft beide zu vernichten haben. In diesem Falle addieren sie sich zur Gesamtleistung N_z.

Beispiel 4: Bekannt sind der Widerstandswert R = 1 MΩ und die zulässige Belastung N_z = 1 W. Gesucht werden der zulässige Strom I_z und die zulässige Spannung U_z. Im **Nomogramm 2** schneidet die Verbindungslinie 1 MΩ...1 W die Stromleiter bei I_z = 1 mA und die Spannungsleiter bei U_z = 1000 V.

3. Der Einfluß der Temperatur

Für die Genauigkeit eines Widerstandes ist von Bedeutung, daß sich sein Widerstandswert mit der Temperatur ändert. Aus diesem Grunde werden auch die Werte für den spezifischen Widerstand ϱ stets für eine bestimmte Bezugstemperatur (Raumtemperatur ϑ_0 = 18 oder 20° C) angegeben. Die Größe der Widerstandsänderung wird durch den Temperaturkoeffizienten (TK) oder Temperaturbeiwert α ausgedrückt. Er gibt als spezifische Größe die verhältnismäßige Widerstandszu- oder -abnahme für 1° C Temperaturunterschied und bezogen auf den Widerstandswert von 1 Ω an. Seine Dimension wird somit Ω/Ω, ° C = 1/° C oder $^\circ C^{-1}$. Da es sich bei α um sehr kleine Werte handelt, gibt man den 10^3- oder 10^6fachen Wert von α an und muß dann diese Werte mit dem 10^{-3}- oder 10^{-6}fachen Wert multiplizieren, um den tatsächlichen Wert für α zu erhalten. Mitunter findet man auch den 10^2fachen Wert für α angeführt und dann seine Dimension in %/°C angegeben. Das ist gleichbedeutend damit, daß in diesem Falle der Wert von α auf 100 Ω und 1° C bezogen worden ist.

In einem bestimmten Temperaturbereich kann α als Materialkonstante betrachtet werden, d. h. innerhalb dieses Bereiches

sind mit hinreichender Genauigkeit die Widerstandsänderungen den Temperaturänderungen proportional (ggfs. als Mittelwert). Da die Widerstandsänderung $R_{\vartheta_0} \cdot \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)$ beträgt, errechnet sich der Widerstandswert bei der Temperatur ϑ aus

$$R_\vartheta = R_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad |\Omega| \qquad (9\,a)$$

Hierin bedeuten:

R_ϑ = Widerstand bei der Temperatur ϑ in Ω,

R_{ϑ_0} = Widerstand bei der Temperatur ϑ_0 in Ω,

α = Temperaturbeiwert in $^\circ C^{-1}$ (+ Widerstandszu- und — Widerstandsabnahme),

ϑ_0 = Bezugstemperatur in °C (z. B. Umgebungstemperatur),

ϑ = Betriebstemperatur in °C.

In gleicher Weise gilt dann für die Temperaturabhängigkeit von ϱ

$$\varrho_\vartheta = \varrho_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad [\Omega mm^2/m] \qquad (9\,b)$$

Ein Vergleich der verschiedenen Widerstandswerkstoffe zeigt, daß der Widerstand der meisten Metalle und Metallegierungen mit wachsender Temperatur zunimmt. α ist dann positiv. Bei einigen Widerstandslegierungen, z. B. den Kupfer- und Silberlegierungen, und stets bei Kohle ist α negativ, da ihr Widerstand mit wachsender Temperatur sinkt. Aber auch ein wechselndes Verhalten, also ein anfängliches Fallen und späteres Wiederansteigen, ist, wie z. B. bei Kupfer-Nickel-Legierungen, festzustellen.

Ein guter Widerstandswerkstoff zeichnet sich in elektrischer Beziehung durch einen hohen Wert für ϱ und einen kleinen Wert für α aus. Um dies zu erreichen, war es notwendig, geeignete Metallegierungen und Halbleiterwerkstoffe zu schaffen.

Mit Rücksicht auf ausreichende Genauigkeit des Widerstandswertes ist es zweckmäßig, sich bei der Auswahl eines Widerstandswerkstoffes durch eine Kontrollrechnung stets davon zu überzeugen, ob innerhalb des Temperaturbereiches, in dem der Widerstand Verwendung finden soll, die Widerstandsänderung ihre zulässige Grenze nicht überschreitet.

Beispiel 5: Es ist der Widerstandswert eines Eisen-Nickel-Drahtes ($\varrho = 0{,}84\ \Omega mm^2/m$) mit einem Durchmesser $d = 0{,}1$ mm

($F = 0{,}007\,85\ mm^2$) und einer Länge $l = 10$ m für eine Temperatur $\vartheta = 77°$ C zu ermitteln.

Der Widerstand bei $\vartheta_0 = 20°$ C ist nach Gleichung (1)

$$R_{\vartheta_0} = \frac{l \cdot \varrho}{F} = \frac{10 \cdot 0{,}84}{0{,}007\,85} = 1\,070\ \Omega$$

Mit einem $\alpha = +\,0{,}7 \cdot 10^{-3}$ ist dann nach Gleichung (9 a)

$$R_\vartheta = 1\,070 \cdot [1 + 0{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot (77 - 20)] = 1\,112{,}7\ \Omega$$

Die Widerstandszunahme beträgt somit 42,7 Ω, d. s. 4 %, ist aus bestimmten Gründen diese Widerstandsänderung nicht tragbar, so ist ein Widerstandsmaterial mit etwa gleichem ϱ, aber kleinerem α zu wählen, z. B. Kruppin ($\varrho = 0{,}85\ \Omega mm^2/m$, $\alpha = +\,0{,}07 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$). Findet der Widerstand stets unter den gleichen Belastungsverhältnissen Verwendung, so kann man ihn auch in der Länge kürzen. Der spezifische Widerstand bei der Temperatur $\vartheta = 77°$ C ist nach Gleichung (9 b)

$$\varrho_\vartheta = 0{,}84 \cdot [1 + 0{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot (77 - 20)] = 0{,}873\ \Omega mm^2/m$$

Damit wird die Länge des Drahtes

$$l = \frac{R_{\vartheta_0} \cdot F}{\varrho_\vartheta} = \frac{1\,070 \cdot 0{,}007\,85}{0{,}873} = 9{,}6\ m$$

d. i. ebenfalls um 4 % kürzer.

Bei bekanntem α läßt sich umgekehrt aus der Widerstandsänderung, d. i. bei konstanter Spannung U gleichbedeutend mit einer Stromänderung I, die Temperatur eines Widerstandes ermitteln. Das ist insbesondere für solche Widerstände von Bedeutung, die mit dem Thermometer nicht zugänglich sind, und findet daher auch bei Trafos, Drosselspulen u. ä. Anwendung. Sind in einem Temperaturbereich ϑ_1 und ϑ_2, bei dem der TK konstant bleibt, die Widerstandswerte $R_{\vartheta 1}$ und $R_{\vartheta 2}$ gemessen worden, so ist $R_{\vartheta 1} = R_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)]$, $R_{\vartheta 2} = R_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_0)]$ und damit durch Subtraktion $R_{\vartheta 2} - R_{\vartheta 1} = R_{\vartheta_0} \cdot \alpha \cdot [(\vartheta_2 - \vartheta_0) - (\vartheta_1 - \vartheta_0)]$ und durch Umformung

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{R_{\vartheta 2} - R_{\vartheta 1}}{\alpha \cdot R_{\vartheta_0}} = \frac{R_{\vartheta 2} - R_{\vartheta 1}}{\alpha' \cdot R_{\vartheta 1}}\ [°C] \qquad (10)$$

worin

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \alpha \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_0)}$$

Beispiel 6: Sind bei einem Widerstand mit $\alpha = +0{,}004\,3\ ^\circ C^{-1}$ ($\vartheta_0 = 18^\circ C$) folgende Werte gemessen worden: $R_{\vartheta 1} = 40\ \Omega$, $R_{\vartheta 2} = 47\ \Omega$ und $\vartheta_1 = 38^\circ C$, so ist die Übertemperatur nach Gleichung (10)

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \frac{47 - 40}{0{,}003\,96 \cdot 40} = 44{,}2^\circ C$$

und damit $\vartheta_2 = 44{,}2 + 38 = 82{,}2\ ^\circ C$.

Will man umgekehrt aus einer bekannten Temperaturzunahme $\vartheta_2 - \vartheta_1$ die Widerstandszunahme ermitteln, so läßt sich auch folgende einfache Gleichung für die prozentuale Widerstandserhöhung anwenden

$$\frac{R_{\vartheta 2} - R_{\vartheta 1}}{R_{\vartheta 1}} \cdot 100 = \alpha' \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1) \text{ in \% von } R_{\vartheta 1}$$

Widerstände für Meßzwecke müssen ein sehr kleines α besitzen, um das Meßergebnis nach dem geforderten Genauigkeitsgrad der Messung ausreichend temperaturunabhängig machen zu können. Als Schichtwiderstände sind hierfür solche der Klasse 0,5 nach DIN 41 400 mit einem TK bis höchstens $\alpha = -0{,}5 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$ für jede Temperatur zwischen −50 und +100° C geeignet. Bei Drahtwiderständen dienen hierfür die Metallegierungen Konstantan, Manganin, Isabellin, Novokonstant und A-Legierung (Therlo) mit einem $\alpha = -0{,}04 \cdot 10^{-3}$ bis $0{,}03 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$. (DIN 41 410 fordert für Drahtwiderstände der Güteklasse 0,5 einen mittleren TK von $\alpha = 0{,}1 \cdot 10^{-3}\ ^\circ C^{-1}$ zwischen 20 und 150° C). Während die TK der letzten drei Legierungen nur für einen Temperaturbereich in der Umgebung der Raumtemperatur (etwa zwischen 10 und 30° C) gelten, ist der Bereich bei Konstantan größer und liegt etwa zwischen 20 und 100° C. Andererseits besitzt jedoch Konstantan mit −40 µV/°C gegenüber z. B. Manganin mit +1 µV/°C eine 40 mal größere Thermokraft gegen Kupfer und ist daher für geringe Meßspannungen unbrauchbar.

Der geringe TK dieser vier Legierungen dient auch dazu, die durch Temperaturerhöhung eingetretene Widerstandserhöhung anderer Stoffe, wie z. B. des Kupfers, auszugleichen. Ist z. B.

in einem Meßinstrument der Widerstand der aus Kupfer bestehenden Spule 50 Ω mit einem $\alpha = +0{,}004\ ^{\circ}C^{-1}$ und schaltet man ihr zur Spannungsmessung einen Konstantanwiderstand von 9950 Ω in Reihe, so sinkt der TK des ganzen Instrumentes auf

$$\alpha = \frac{50 \cdot 0{,}004 + 9950 \cdot (-0{,}000\,03)}{50 + 9950} = -1 \cdot 10^{-3}\ ^{\circ}C^{-1}$$

Für sehr hohe Anforderungen an die Meßgenauigkeit, wie sie bei Präzisions- und Normalwiderständen bestehen, ist die Annahme einer Proportionalität zwischen Widerstands- und Temperaturänderung nicht mehr ausreichend. Man stellt dann die Widerstandsänderung mit Hilfe von zwei TK, α und β, genauer als quadratische Funktion der Temperaturänderung dar durch

$$R\vartheta = R_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0) + \beta \cdot (\vartheta - \vartheta_0)^2] \quad [\Omega] \qquad (11)$$

Nach Gleichung (11) ist die Widerstandsänderung infolge von Temperaturänderungen um so geringer, je kleiner α und β sind, sie ist weiterhin um so linearer, je kleiner β ist. Die TK α und β gelten für Temperaturänderungen, die nur wenig von der Raumtemperatur abweichen, d. i. neben geringen Raumtemperaturschwankungen selbst nur für kleine Wattbelastungen. Für Präzisions-Normalwiderstände mit einer Genauigkeit von ± 0,03 % ist sie mit maximal 1 W begrenzt worden.

4. Der Einfluß von Zeit und Feuchtigkeit

Widerstände ändern mit der Zeit ihren Widerstandswert, und zwar unabhängig von der Temperatur oder anderen Einflüssen. Das gilt sowohl für Draht- als auch für Kohleschichtwiderstände. Metallische Widerstandswerkstoffe sind nach dem Guß noch nicht ganz homogen und werden weiterhin durch Kaltbearbeitung stark verformt. Hierdurch würde sich der spezifische Widerstand noch längere Zeit verändern, wenn nicht durch eine natürliche Alterung, nämlich durch Lagern über längere Zeit, oder durch künstliche Alterung, nämlich durch längere normale oder kurzzeitige Überbelastung und eine entsprechende Erwärmung für eine Entspannung und Homogenisierung des Widerstandswerkstoffes Sorge getragen wird. Für die Konstanz oder Stabilität der elektrischen Werte eines

Kohleschichtwiderstandes ist naturgemäß die physikalische Struktur der aufgebrachten Kohleschicht von Bedeutung, und zwar neben Härtegrad der Schicht auch Homogenität in bezug auf Kristallablagerung, Kristallgröße und Schichtdicke. Es muß daher schon bei der Herstellung der Schicht auf die Alterungsmöglichkeit Rücksicht genommen werden, damit sie sich mit der Zeit in ihrem molekularen oder atomaren Gefüge nur wenig verändert.

Der Feuchtigkeitseinfluß kann sich in zweifacher Weise auswirken, nämlich bei hochohmigen Widerständen als Kriechstrom-Nebenschluß und in Verbindung mit Wärme korrodierend auf die empfindliche Oberfläche des Schichtwiderstandes oder den dünnen Draht von Drahtwiderständen. Als Oberflächenschutzmittel, zugleich auch gegen mechanische Beschädigung, dienen besonders ausgesuchte und erprobte Lacke, insbesondere auch Spezial-, Hochtemperatur- und Tropenlacke, bei Drahtwiderständen mit hohen Belastungen und daher hohen Betriebstemperaturen auch Zement- und Glasurschichten. Auch Kunstharzumkleidungen setzen sich seit kurzem immer mehr durch, insbesondere solche aus Epoxydharz, das nicht nur einen sehr guten Schutz gegen Berührung mit spannungführenden Teilen bietet, sondern auch schwer entflammbar und selbstlöschend ist, gute Kälte- und Hitzebeständigkeit besitzt und sich zum Einsatz in tropischem und arktischem Klima eignet. Weiterhin dienen als Mittel zum Oberflächenschutz: Isolieren durch Schlauchüberzug, Umpressen mit Kunststoff, Einlöten in Keramikrohr u. ä.

II. Runddrähte aus Leiter- und Widerstandswerkstoffen

1. Leiterwerkstoffe

Leiter sind alle Metalle und Metallegierungen. Infolge ihrer hohen elektrischen Leitfähigkeit werden für stromführende Teile des Apparatebaus überwiegend Kupfer und Aluminium verwendet. Als „Kupfer für die Elektrotechnik" nach DIN 40 500 kommt nur Elektrolytkupfer (DIN 1708) mit einem Reingehalt von etwa 99,95 %, als „Aluminium für die Elektrotechnik" nach DIN 57 202 für den gleichen Zweck nur ein Reinaluminium

(DIN 1712) mit einem Reingehalt von mindestens 99,5 % in Betracht. Es sind für sie folgende elektrische Werte festgelegt:

Runddrähte aus Kupfer für die Elektrotechnik:
spezifischer Gleichstromwiderstand Nennwert bei 20° C:
$\varrho = 0{,}017\,54\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\varkappa = 57\ \text{Sm/mm}^2$, $\alpha = 3{,}80 \cdot 10^{-3}\ °\text{C}^{-1}$.

Runddrähte aus Aluminium für die Elektrotechnik:
spezifischer Widerstand Grölltwert bei 20° C:
a) E — AlF 7: $\varrho = 0{,}027\,78\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\varkappa = 36\ \text{Sm/mm}^2$,
b) E — AlF 9: $\varrho = 0{,}028\,25\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\varkappa = 35{,}4\ \text{Sm/mm}^2$,
c) E — AlF 13: $\varrho = 0{,}028\,49\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\varkappa = 35{,}1\ \text{Sm/mm}^2$,
d) E — AlF 17: $\varrho = 0{,}028\,74\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, $\varkappa = 34{,}8\ \text{Sm/mm}^2$,
für a) bis d): $\alpha = 3{,}96 \cdot 10^{-3}\ °\text{C}^{-1}$.

Für den Bau von Fernmelde- und Meßgeräten werden vorzugsweise genau gezogene Kupfer-Runddrähte nach DIN 46 431 mit Nenndurchmessern von 0,03 bis 1 mm (Typ F) verwendet. Genau gezogene runde Aluminiumdrähte für den Maschinen- und Apparatebau mit einem Durchmesser von 0,15 bis 6 mm sind in DIN 46 425 enthalten. Für jeden Nenndurchmesser der Kupfer-Runddrähte sind in DIN 46 431 Nenn- und Grenzwerte des Widerstandes für 1 m Drahtlänge (Meterwiderstand R' in Ω/m) festgelegt worden. Entsprechend diesem Widerstandsspielraum dürfen die tatsächlichen Durchmesser vom Nenndurchmesser abweichen, da diese nicht für einen bestimmten Durchmesser, sondern auf einen bestimmten Widerstandswert für die Meterlänge gezogen werden. Dieser ist nämlich im allgemeinen für die Berechnung und Herstellung von Geräten wichtiger als ein genauer Drahtdurchmesser oder die Einhaltung eines genauen Wertes für ϱ. Insofern sind auch die in DIN 46 431 angeführten Abmaße der Nenndurchmesser für Drähte Typ F nur Richtwerte.

Aluminiumdrähte werden hergestellt für Durchmesser

von 0,15 bis 0,7 mm aus E — AlF 9 oder E — AlF 13,
über 0,7 bis 4,5 mm aus E — AlF 7 oder E — AlF 17,
über 4,5 bis 6,0 mm aus E — AlF 7 oder E — AlF 13,

wobei sich die vier Aluminiumwerkstoffe durch ihre Zugfestigkeit unterscheiden (die Zahl im Kurzzeichen bedeutet Mindestzugfestigkeit in kg/mm²). Für den Meterwiderstand von Aluminiumdrähten sind keine Grenzwerte festgelegt worden, viel-

Tafel 1. Spezifischer Widerstand, Leitfähigkeit und Temperaturkoeffizient der reinen Metalle Bezugstemperatur 18° C

Metall	Spez. Widerstd. ϱ $\Omega mm^2/m$	Leitfähigkeit $\varkappa = 1/\varrho$ Sm/mm^2	Temper. Koeff. $\alpha \times 10^3$ $°C^{-1}$
Aluminium	0,0256	35,0	+ 4,1
Antimon	0,383	2,6	+ 3,4
Arsen	0,345	2,9	+ 3,9
Blei	0,208	4,8	+ 4,2
Cadmium	0,076	13,2	+ 4,2
Cäsium	0,21	4,73	+ 4,4
Calcium	0,046	21,6	+ 3,3
Cer	0,77	1,3	—
Chrom	0,0257	39,0	—
Eisen (Elektrolyt)	0,1	10,0	+ 6,6
Gallium	0,5	2,0	+ 4,0
Gold	0,022	45,4	+ 4,0
Indium	0,0833	12,0	+ 4,3
Iridium	0,053	19,0	+ 4,1
Kalium	0,071	14,1	+ 5,8
Kobalt	0,096	10,4	+ 6,6
Kupfer	0,0173	57,8	+ 4,3
Lantham	0,588	1,7	—
Lithium	0,085	11,8	+ 4,4
Magnesium	0,0425	23,5	+ 4,1
Mangan	0,044	22,8	—
Molybdän	0,0427	23,4	+ 4,7
Natrium	0,046	21,7	+ 5,5
Nickel	0,1175	8,5	+ 6,7
Osmium	0,095	10,5	+ 4,2
Palladium	0,102	9,8	+ 3,7
Platin	0,105	9,5	+ 3,9
Quecksilber 0° C	0,94	1,063	+ 0,988
Rhenium	0,21	4,77	—
Rhodium	0,06	16,6	+ 4,4
Rubidium	0,123	8,1	+ 5,2
Ruthenium	0,145	6,9	—
Silber	0,016	62,5	+ 4,1
Strontium	0,303	3,3	+ 3,8
Tantal	0,147	6,8	+ 3,5
Thallium	0,173	5,7	+ 4,8
Wismut	1,17	0,855	+ 4,5
Wolfram	0,053	18,9	+ 4,8
Zink	0,059	17,0	+ 4,2
Zinn	0,110	9,1	+ 4,6

mehr genügt hier die Errechnung des Nenn-Meterwiderstandes aus der umgeformten Gleichung (1), in der l = 1 m wird, mit

$$R' = \frac{\varrho}{F} \quad [\Omega/m]$$

und mit Hilfe der in DIN 46 425 enthaltenen Werte für den Drahtquerschnitt F.

Zum Vergleich mit diesen beiden Leiterwerkstoffen sind in **Tafel 1** Werte für ϱ, $\varkappa$ und α der *reinen* Metalle aufgeführt worden.

2. Widerstandswerkstoffe

Widerstandswerkstoffe sind Metallegierungen, deren spezifische Widerstände zwischen etwa 0,2...1,5 $\Omega mm^2/m$ liegen. Man unterscheidet nach dem Gebrauchszweck technische Widerstände (Vorschalt-, Regel-, Anlaßwiderstände u. a.) und Meßwiderstände mit folgender Legierungseinteilung:

A) Kupferlegierungen **(Tafel 2 a)**
   a) zinkhaltige Kupferlegierungen
   b) Kupfer-Nickel-Legierungen
   c) Kupfer-Mangan-Legierungen

B) Silberlegierungen **(Tafel 2 b)**

C) Chrom-Nickel-Legierungen **(Tafel 2 c)**
   a) eisenfrei (NC)
   b) eisenhaltig
      ba) eisenarm (NCF)
      bb) eisenreich (nickelarm) (FNC)

D) Chrom-Eisen-Legierungen (Tafel 2 c)
   a) Chrom-Eisen-(Silizium)-Legierungen (FC)
   b) Chrom-Eisen-Aluminium-Legierungen mit hohem spezifischen Widerstand (FCA)
   c) Chrom-Eisen-Aluminium-Legierungen mit niedrigem spezifischen Widerstand (FCA)

Für Meßwiderstände insbesondere sind in Anwendung
Kupfer-Mangan-Legierungen aus der Gruppe A, c.
Silber-Mangan-Legierungen aus der Gruppe B und
Gold-Chrom-Legierungen.

Tafel 2a. Eigenschaften metallischer

	Werkstoff Cu-Legierung 1. zinkhaltig, 2. nickelhaltig, 3. manganhaltig	Chemische Zusammensetzung	Spez. Widerstand bei 20° C ϱ $\Omega mm^2/m$	Spez. Leitwert bei 20° C $\varkappa = 1/\varrho$ Sm/mm^2	Widerstandstemperaturkoeff. $\alpha \times 10^3$ in der Umgebung der Raumtemper. $\vartheta\,C^{-1}$	 zwisch. 20° u. 100° C $\vartheta\,C^{-1}$
	1	2	3	4	5	6
1	Neusilber Huwe 30	60% Cu 17% Ni 23% Zn	0,3	3,33	—	0,35
	Nickelin-Neusilber, Ni III	58% Cu 22% Ni 20% Zn	0,36	2,78	—	0,31
	Nickelin Ni I	54% Cu 26% Ni 20% Zn	0,43	2,32	—	0,23
2	Konstantan Ia Ia	54% Cu 45% Ni 1% Mn	0,5	2,0	—	- 0,03
	Nickelin (zink- u. eisenfrei)	67% Cu 30...31% Ni 2...3% Mn	0,4	2,5	—	0,11
3	Manganin	86% Cu 12% Mn 2% Ni	0,43	2,32	0,02	—
	Isabellin	84% Cu 13% Mn 3% Al	0,5	2,0	—0,02	—
	Novokonstant	82,5% Cu 12% Mn 4% Al 1,5% Fe	0,45	2,22	—0,04	—
	A-Legierung (Therlo)	85% Cu 9,5% Mn 5,5% Al	0,45	2,22	0,02 (0,001)	—

Gesondert sind in **Tafel 2d** noch einige ältere Widerstandslegierungen aufgeführt worden.

Metallische Widerstandswerkstoffe werden durch Legieren von reinen Metallen hergestellt. Durch Mischen zweier oder mehrerer Legierungsbestandteile ist es nicht möglich, auch wenn jeder für sich eine hohe Leitfähigkeit besitzt, eine Legierung herzustellen, die eine gleiche oder höhere Leitfähigkeit als die Grundmetalle besitzt. So wird z. B. die gute Leitfähigkeit des Kupfers durch Zusatz von einigen Prozent Silber von 57,8 auf

Widerstandswerkstoffe: Kupfer-Legierungen

Wärmeleitfähigkeit bei 20° C	Wärmeleitfähigkeit zwisch. 20° u. 100° C	Spezifische Wärme	Thermokraft gegen Kupfer	Dichte	Schmelzpunkt	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung	Linearer Ausdehnungskoeffiz. zwisch. 20° u. 100° C × 10⁶ mm/m, °C	Höchste zulässige Gebrauchstemperatur
cal/cm, s, °C	cal/cm, s, °C	cal/g, °C	µV/°C	g/cm³	°C	kg/mm²	%		°C
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0,6	—	0,095	—15	8,6	~ 1000	40	35	18	—
—	—	0,097	—	8,7	1125	weich: 31 hart: 83	weich: 34 hart: 1	16,8	—
—	—	0,094	—	8,7	1145	weich: 60 hart: 85	weich: 30 hart: 1,5	16	—
0,048	—	0,098	—40	8,9	1275	weich: 50 hart: 75	weich: 30 hart: 3	14	400
—	—	0,095	—	8,9	1230	weich: 44	33...15	16	300
—	—	—	+1,0	8,4	960	50...55	25	18,1	300
—	—	—	—0,2	8,0	—	50...55	25	16	400
—	—	—	—0,3	—	970	50...55	15...25	18	400
—	—	—	—0,3	—	—	50...55	15...25	—	—

etwa 46 Sm/mm² gesenkt, obwohl auch Silber eine hohe Leitfähigkeit von 62,5 Sm/mm² besitzt. Schon die in den Grundmetallen vorhandenen Verunreinigungen bewirken eine starke Erniedrigung der Leitfähigkeit insbesondere dann, wenn sie unter Bildung von homogenen Mischkristallen aufgenommen werden. Daher eignen sich umgekehrt hochschmelzende Mischkristallegierungen auch gut für die Herstellung von Widerstandswerkstoffen, d. s. vor allem Legierungen aus Kupfer, Silber, Nickel, Eisen, Chrom oder Mangan.

Tafel 2 b. Eigenschaften metallischer

Werkstoff	Chemische Zusammensetzung	Kaltverformter ungeglühter Zustand						
		Spez. Widerstand bei 20° C ϱ	Spez. Leitwert bei 20° C $\varkappa = 1/\varrho$	Widerstands-temper-Koeffiz. in der Umgebung d. Raumtemp. $\alpha \times 10^3$	Thermo-EMK gegen Kupfer	Dichte	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung
		$\Omega mm^2/m$	Sm/mm^2	$\vartheta\ C^{-1}$	$\mu V/\vartheta\ C$	g/cm^3	kg/mm^2	%
1	2	3	4	5	6	7	8	9
NBW 108	82% Ag 10% Mn 8% Sn	0,55	1,82	—0,040	+0,5	9,38	61	2
NBW 139	78% Ag 13% Mn 9% Sn	0,61	1,64	—0,060	—0,1	9,45	43	1
NBW 173	80% Ag 17% Mn 3% Sn	0,58	1,73	—0,105	+2	9,12	47	1
NBW 87	85% Ag 8% Mn 7% Sn	0,435	2,3	+0,010	—0,4	9,70	29	22
Zinnfreie Legierung	91,22% Ag 8,78% Mn	0,32	3,12	—0,04	+2,5	9,51	45	2

Die meist gebrauchten Widerstandsdrähte sind in DIN 46 460 in Gruppen mit gleich großen spezifischen Widerständen zusammengefaßt worden. Um Fortschritte in der Entwicklung neuer Legierungen nicht zu hindern, sind nicht bestimmte Widerstandslegierungen, sondern nur ihre spezifischen Widerstände bei 20° C mit einem ausreichenden Spielraum genormt worden. Es werden folgende Gruppen unterschieden:

WM 13: Eisen verzinnt oder verzinkt (als Rostschutz):
$\varrho_{mittel} = 0{,}13$, $\varrho_{min} = 0.12$, $\varrho_{max} = 0{,}14\ \Omega mm^2/m$

WM 30: Hauptsächlich Kupfer-Nickel-Legierungen, die auch Zink enthalten:
$\varrho_{mittel} = 0{,}30$, $\varrho_{min} = 0{,}28$, $\varrho_{max} = 0{,}32\ \Omega mm^2/m$

WM 43: Manganin, eine Legierung aus Mangan, Nickel und Kupfer (kleine Termokraft gegen Kupfer, kleiner TK):
$\varrho_{mittel} = 0{,}43$, $\varrho_{min} = 0{,}42$, $\varrho_{max} = 0{,}44\ \Omega mm^2/m$

Widerstandswerkstoffe: Silber-Legierungen

getemperter Zustand									
Temperatemperatur	Temperzeit	Spez. Widerstand bei 20°C ϱ	Spez. Leitwert bei 20° C $\varkappa = 1/\varrho$	Widerstandstemp.-Koeffizient in der Umgebung der Raumtemperat. ϑ C^{-1}		Linear. Temperaturbereich	Thermo-EMK gegen Kupfer	Zerreißfestigkeit	Bruchdehnung
ϑ C	h	Ωmm^2/m	Sm/mm^2	$\alpha \times 10^3$	$\beta \times 10^6$	ϑ C	μV/ϑ C	kg/mm^2	%
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
175 (430)	10	0,51	1,96	+1,70	+0,23	gering	+0,5	39	12
195	10	0,57	1,76	−0,47	+0,21	150	−0,2	52	1
270 (400)	3 × 6	0,46	2,17	−0,49	+0,05	200	+2	57	1
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
250 oder 215	10 40	0,28	3,57	−0,63	+0,042	150	+2,5	45	2

WM 50: Hauptsächlich Legierungen aus Kupfer mit Nickel oder Mangan, die Zink und Eisen nicht enthalten dürfen:

$\varrho_{mittel} = 0{,}50$, $\varrho_{min} = 0{,}47$, $\varrho_{max} = 0{,}51$ $\Omega mm^2/m$

WM 100: Hauptsächlich Legierungen aus Eisen und Nickel; Chrom und Nickel; Chrom, Nickel und Eisen:

$\varrho_{mittel} = 1{,}0$, $\varrho_{min} = 0{,}85$, $\varrho_{max} = 1{,}04$ $\Omega mm^2/m$

WM 110: Hauptsächlich Legierungen aus Chrom und Nickel mit oder ohne Zusatz von Eisen oder anderen Metallen:

$\varrho_{mittel} = 1{,}1$, $\varrho_{min} = 1{,}04$, $\varrho_{max} = 1{,}16$ $\Omega mm^2/m$

WM 120: wie Gruppe WM 110:

$\varrho_{mittel} = 1{,}2$, $\varrho_{min} = 1{,}14$, $\varrho_{max} = 1{,}26$ $\Omega mm^2/m$

In DIN 46 461 sind entsprechend diesen spezifischen Widerstandswerten für die Drahtdurchmesser von 0,03...10 mm Rechnungs- und Grenzwerte des Meterwiderstandes zu finden. Sie gelten jedoch nur für weiche Drähte. Auch Widerstandsdrähte

Tafel 2c. Eigenschaften metallischer Widerstandswerkstoffe:

Werkstoff 1. Eisenfreie Chrom-Nickel-Leg. (NC) 2. Eisenhaltige Chrom-Nickel-Leg. (NCF u. FNC) 3. Chrom-Eisen-Silizium-Leg. (FC) 4. Chrom-Eisen-Aluminium-Leg. (FCA)		Chemische Zusammensetzung	Spezif. Widerstand bei 20° C ϱ $\Omega mm^2/m$	Spezif. Leitwert bei 20° C $\varkappa = 1/\varrho$ Sm/mm^2
1	2	3	4	
1	Chronin 100; Hawe 105; Cr Ni; Cekas II; NCT 8; 80/20; CN 80; C 0; C 00	20 % Cr 77...80 % Ni 0... 2 % Mn	1,05...1,10	0,95...0,91
2	Ferrochronin; Hawe 110	62 % Ni 15 % Cr 23 % Fe	1,10	0,91
	Cr Ni Fe II; Cekas	63 % Ni, 15 % Cr, 20 % Fe, 2 % Mn	1,12	0,89
	Cr Ni Fe I; CNF 65; NCT 6; Thermochrom	70 % Ni, 20 % Cr, 8 % Fe, 2 % Mn	1,11	0,90
	B 7 M (Contracid)	60 % Ni, 15 % Cr, 15 % Fe, 7 % Mo, 2 % Mn, 1 % Si	1,16	0,86
	CNE-Leg; NCT 3; Pyrotherm; Cekas 0; Cekas I; Cr Ni „F"	20 % Ni, 25 % Cr, 55 % Fe	0,97	1,03
	Cr Ni Fe III	29 % Ni, 20 % Cr, 48,5 % Fe, 2 % Mn, 0,5 % Si	1,03	0,97
3	20 % Chrom	17...20 % Cr 0,5...2 % Si 0,5 % Mn, Rest Fe	0,75	1,33
	30 % Chrom	28...32 % Cr 0,5...1,5 % Si 0,5 % Mn, Rest Fe	0,81	1,23
4	Megapyr I	63 % Fe 30 % Cr 5 % Al	1,4	0,715
	Cekas-Extra; CAF-Leg; Permatherm; Alsichrom	75 % Fe 20 % Cr 5 % Al	1,4	0,715
	Kanthal A 1	72 % Fe, 20 % Cr 5 % Al, 3 % Co	1,45	0,69
	Sichromal 12; Megapyr II	76 % Fe 20 % Cr 3,5 % Al	1,17	0,855
	CRA-Leg	86 % Fe 12 % Cr	1,1	0,91
	Sichromal 10; Megapyr III	2 % Al	0,88	1,135

Chrom-Nickel- und Chrom-Eisen-Legierungen

Widerstands-temp.-Koeff. zwisch. 20° u. 100° C $\alpha \times 10^3$ / °C^{-1}	Wärmeleitfähigkeit cal/cm. s. °C	Linearer Ausdehnungskoeff. $\times 10^6$ mm/m. °C	Spezif. Wärme cal/g. °C	Thermo-EMK gegen Kupfer µV/°C	Dichte g/cm³	Schmelzpunkt °C	Zerreißfestigkeit kg/mm²	Bruchdehnung %	Höchste zulässige Gebrauchstemp. °C
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,14	0,04	14	0,103	+14	8,4	1400	70...75	30	1100...1150
0,15	0,03	13	0,11	—	8,15	1390	70...75	30	1050...1100
0,13	0,03	13	0,11	—	8,25	1390	70...75	30	1050...1100
0,10	0,03	14	0,11	—	8,27	1395	65...70	30	1050...1100
0,09	0,03	13	0,11	—	8,35	1365	80	27	1050
0,44	0,03	14,5	0,12	—	7,8	≈ 1375	60	45	1000
0,35	—	—	—	—	7,9	1400	—	—	1000
1	0,05	11	0,11	—	7,6	1425	60...70	15	900
1	0,05	10	0,11	—	7,6	1470	60...70	15	1000
0,025	0,03	15,5	0,12	—	7,1	1500	80	15	1300...1350
0,04	0,03	15	0,12	—	7,1	1500	70	18	1300
0,06	0,03	17	0,12	—	7,1	1500	80	14	1300
0,04	0,04	15	0,12	—	7,4	1475	65	14	1200
0,07	0,045	13	0,12	—	7,4	1450	65	14	1000

Tafel 2 d. Spezifischer Widerstand, spezifischer Leitwert und Temperaturkoeffizient der älteren Widerstandslegierungen

Werkstoff	Spezif. Widerst. bei 20° C ϱ $\Omega mm^2/m$	Spezif. Leitwert bei 20° C $\varkappa = 1/\varrho$ Sm/mm^2	Widerstds.-Temp.-Koeff. $\alpha \times 10^3$ $°C^{-1}$
Platin-Rhodium (10 % Rh)	0,2	5,0	+1,7
Platinsilber	0,261	3,83	+0,3
Patentnickel, Kupfernickel (75 % Cu, 25 % Ni)	0,33	3,0	+0,19
Neusilber, Argentan, Nickelin (i. M. 60 % Cu, 20 % Ni, 20 % Zn)	0,3...0,4	3,3...2,5	+0,3
Blanca	0,47	2,12	+0,11
Resistin	0,49	2,04	+0,02
Rheotan	0,49	2,04	+0,023
Spezial	0,49	2,04	+0,04
Kulmiz	0,74	1,35	+0,008
Kupfer-Manganlegierung (25 % Mn)	0,81	1,23	+0,05
Eisen-Nickel (70 % Fe, 30 % Ni)	0,84	1,19	+0,7
Kruppin (Fe, Ni)	0,85	1,18	+0,07
Superior	0,85	1,18	+0,07
Kupfer-Manganlegierung (30 % Mn)	1,073	0,93	+0,04
Kanthal D	1,35	0,742	+0,091
Kanthal A	1,39	0,72	+0,088

werden aus den bereits genannten Gründen nicht für einen bestimmten Durchmesser, sondern auf einen bestimmten Meterwiderstand gezogen. Da Widerstandsdrähte nur nach dem Nenndurchmesser und der Gruppenbezeichnung unter Hinzufügung der Sonderbezeichnung des Herstellers und des Härtegrades (weich, halbhart, hart) bestellt werden sollen, z. B. „Widerstandsdraht 1,2 DIN 46 461, WM 50, Isabellin, weich" für einen blanken und „Widerstandsdraht SS 1,2 DIN 46 462, WM 50, Isabellin, weich" für einen isolierten Widerstandsdraht mit zweifacher Seidenbespinnung, aus den DIN aber die handelsüblichen Bezeichnungen nicht hervorgehen, sind diese in den Tafeln 2 a bis 2 d nach metallurgischen Gesichtspunkten geordnet zusammengestellt worden. Ihr ϱ-Wert gibt jeweils an, zu welcher WM-Gruppe sie gehören, da die Gruppen-Nr. dem Rechnungswert von ϱ entspricht. Zur eingehenden Beurteilung der Verwendbarkeit der Widerstandswerkstoffe sind in diesen Tafeln neben den elektrischen auch noch eine Anzahl weiterer physikalischer Werte aufgenommen worden, wie z. B. Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme, Schmelzpunkt, Ausdehnungskoeffizient, höchstzulässige Gebrauchstemperatur usw.

Zur schnellen Ermittlung des Meterwiderstandswertes genormter Drahtdurchmesser dient Tafel 3. In dieser wurden zur Vereinfachung die Widerstandswerkstoffe in Gruppen mit mittlerem spezifischem Widerstand ϱ_m zusammengefaßt, und zwar mit einer größten Abweichung von den Rechenwerten in Höhe von $\pm$ 0,05 $\Omega mm^2/m$, die im Hinblick auf den Grenzwertbereich der Meterwiderstände praktisch im allgemeinen bedeutungslos ist.

Beispiel 7: Es ist der Meterwiderstand R' eines Konstantandrahtes von $d = 1$ mm Durchmesser zu ermitteln.

In Tafel 3, Spalte 6, findet man für $d = 1$ mm ein $R' = 0{,}612\ \Omega/m$ ($\varrho_m = 0{,}48\ \Omega mm^2/m$). Nach Tafel 2 a ist der genaue Wert für $\varrho = 0{,}5\ \Omega mm^2/m$ und damit $R' = \varrho/F = 0{,}5/0{,}785 = 0{,}64\ \Omega/m$. Umgekehrt läßt sich auch mit Hilfe von R' auf ϱ und das vermutliche Widerstandsmaterial schließen. Hat man z. B. den Widerstand eines Drahtes von $d = 1$ mm und $l = 50$ m mit $R = 32\ \Omega$ gemessen, so ist $R' = 32/50 = 0{,}64\ \Omega/m$, $\varrho = R' \cdot F = 0{,}64 \cdot 0{,}785 = 0{,}5\ \Omega mm^2/m$, das Material vermutlich Konstantan.

Da Tafel 3 nach steigenden Widerstandswerten geordnet ist, läßt sich mit ihr auch ein passender Widerstandswert dann leicht finden, wenn man bei vorhandenem Widerstandskörper an eine bestimmte Drahtlänge gebunden ist und ein bestimmter Widerstandswert aufgebracht werden muß. Hat man z. B. einen Widerstandskörper verfügbar, der bei $d = 0{,}06$ mm Drahtdurchmesser eine Drahtlänge von $l = 5$ m aufnehmen kann und soll der Widerstandswert $R = 1{,}5\ k\Omega$ betragen, so ist $R' = 1500/5 = 300\ \Omega/m$, d. i. gem. Spalte 9 der Tafel 3, je nachdem was verfügbar ist, Cu-Mn 25 %, Fe-Ni 30 %, Kruppin oder Superior.

Zum Bewickeln von Spulenkörpern (Trafos, mehrlagigen Feindraht-Festwiderständen nach DIN 41 528) werden isolierte Drähte benötigt. Für die Bestimmung der hierfür nötigen Wickelraumgröße muß dann außer dem blanken Drahtdurchmesser auch die Größe des Isolationsauftrages bekannt sein. Man findet ihn für

1. einfach und doppelt lackisolierte Kupfer-Runddrähte in DIN 46 435, Bl. 1,
2. ein- und mehrfach mit Seide oder Baumwolle umsponnene Kupfer-Runddrähte in DIN 46 436, Bl. 1,

Tafel 3. Meterwiderstand der Widerstandsdrähte (Ω/m) in

Blanker Draht-		Platin-Rhodium Platin-Silber Zinnfr. Leg.	Huwe 30 Ni III Patent-nickel Neusilber	Ni I Nickelin Manganin NBW 87 NBW 173	Isabellin Novokonstant A-Leg. Konstantan NBW 108 Blanca Resistin Rheotan Spezial	NBW 139
Durchmesser	Querschnitt					
mm	mm²	$\varrho_m = 0{,}23$	$\varrho_m = 0{,}34$	$\varrho_m = 0{,}43$	$\varrho_m = 0{,}48$	$\varrho = 0{,}57$
1	2	3	4	5	6	7
0,03	0,000707	325	481	609	679	806
4	0,00126	182,5	250	341	381	452
5	0,00196	117	173,5	219	245	291
6	0,00283	81,3	120,0	152	169,5	202
7	0,00385	59,7	83,4	111,5	124,7	147
8	0,00503	45,7	67,6	85,6	95,5	113
9	0,00636	36,1	53,4	67,6	75,5	89,5
0,10	0,00785	29,3	43,3	54,8	61,2	72,6
1	0,00950	24,2	35,8	45,3	50,5	60,0
2	0,0113	20,4	30,1	38,0	42,5	50,4
4	0,0154	14,9	22,05	27,9	31,4	37,0
5	0,0177	13,0	19,4	24,3	27,1	32,2
6	0,0201	11,4	16,9	21,4	23,9	28,3
8	0,0254	9,05	13,4	16,93	18,9	22,4
0,20	0,0314	7,33	10,8	13,7	15,3	18,2
2	0,0380	6,05	8,95	11,3	12,65	15,0
5	0,0491	4,68	6,92	8,76	9,78	11,6
8	0,0616	3,73	5,51	6,98	7,80	9,25
0,30	0,0707	3,25	4,81	6,08	6,8	8,06
3	0,0804	2,86	4,23	5,35	5,97	7,10
5	0,0962	2,39	3,53	4,47	4,99	5,92
0,40	0,126	1,82	2,70	3,41	3,81	4,52
5	0,159	1,45	2,14	2,70	3,02	3,58
0,50	0,196	1,17	1,77	2,19	2,45	2,90
5	0,237	0,97	1,43	1,81	2,02	2,40
0,60	0,283	0,81	1,20	1,52	1,695	2,01
5	0,332	0,693	1,02	1,30	1,445	1,72
0,70	0,385	0,598	0,884	1,115	1,245	1,48
0,80	0,503	0,456	0,676	0,855	0,955	1,13
0,90	0,636	0,361	0,534	0,675	0,755	0,895
1,0	0,785	0,293	0,433	0,548	0,612	0,726
1	0,9503	0,241	0,357	0,453	0,505	0,600
2	1,13	0,204	0,30	0,380	0,425	0,504
4	1,539	0,148	0,218	0,276	0,304	0,366
6	2,011	0,114	0,169	0,214	0,238	0,283
8	2,54	0,090	0,134	0,169	0,189	0,224
2,0	3,14	0,073	0,108	0,137	0,153	0,182
2	3,80	0,060	0,0895	0,113	0,126	0,150
5	4,91	0,047	0,0692	0,0876	0,098	0,116
8	6,16	0,037	0,0551	0,0698	0,078	0,0925
3,0	7,07	0,032	0,0481	0,0608	0,068	0,0806
3	8,553	0,027	0,0397	0,0503	0,056	0,0666
5	9,621	0,024	0,0354	0,0448	0,050	0,0594

Gruppen zusammengefaßt bei mittlerem spez. Widerstand ϱ_m

Kulmiz Chrom-Eisen-Silizium	Cu-Mn 25 % Fe-Ni 30% Kruppin Superior	Eisenhaltige u. eisenfreie Chrom-Nickel Cu-Mn 30 %	Chrom-Eisen-Aluminium	Kanthal D Kanthal A	Kanthal A_1	Kupfer Rechnungswert nach DIN 46 441	Aluminium
$\varrho_m = 0{,}76$	$\varrho_m = 0{,}85$	$\varrho_m = 1{,}073$	$\varrho_m = 1{,}25$	$\varrho_m = 1{,}37$	$\varrho = 1{,}45$	$\rho = 0{,}01754$	$\varrho = 0{,}028$
8	9	10	11	12	13	14	15
1075	1200	1520	1770	1935	2050	24,82	39,60
603	674	853	992	1085	1150	13,96	22,21
388	433	548	638	699	740	8,94	14,30
268,5	300	380	442	484	512	6,21	9,91
197,5	220,5	279	325	356	376,5	4,56	7,27
151,0	168,5	214	249	272	288,0	3,49	5,56
119,5	133,5	169	196,5	215	228,0	2,76	4,40
96,8	108,1	137	159,5	174,2	184,5	2,23	3,57
80,0	89,5	113	131,5	144,2	152,5	1,846	2,94
67,2	75,2	95,2	110,5	121,2	128,2	1,551	2,48
49,3	55,2	69,8	81,2	89,0	94,2	1,140	1,82
42,9	48,0	60,6	70,6	72,4	82,0	0,993	1,58
37,8	42,3	53,4	62,2	68,2	72,1	0,873	1,39
29,9	33,4	42,3	49,2	54,0	58,1	0,689	1,10
24,2	27,1	34,2	39,8	43,6	46,2	0,558	0,89
20,0	22,4	28,3	32,9	36,0	38,1	0,462	0,73
15,45	17,3	21,85	25,4	27,9	29,5	0,357	0,57
12,31	13,8	17,43	20,2	22,2	23,6	0,285	0,45
10,75	12,0	15,2	17,7	19,4	20,5	0,248	0,40
9,45	10,055	13,35	15,5	17,0	18,1	0,218	0,35
7,9	8,84	11,15	13,0	14,4	15,1	0,1824	0,29
6,03	6,74	8,53	9,92	10,9	11,5	0,1396	0,22
4,78	5,34	6,75	7,86	8,6	9,1	0,1103	0,18
3,88	4,33	5,48	6,37	7,0	7,4	0,0894	0,143
3,21	3,59	4,04	5,28	5,8	6,1	0,0738	0,118
2,685	3,0	3,79	4,42	4,8	5,1	0,0621	0,099
2,285	2,56	3,24	3,76	4,1	4,4	0,0529	0,084
1,975	2,21	2,79	3,25	3,6	3,75	0,0456	0,073
1,51	1,69	2,14	2,49	2,72	2,88	0,0349	0,056
1,195	1,34	1,69	1,965	2,15	2,28	0,0276	0,044
0,97	1,08	1,37	1,59	1,74	1,85	0,0223	0,036
0,80	0,895	1,13	1,32	1,44	1,53	0,0185	0,029
0,673	0,752	0,95	1,105	1,26	1,28	0,016	0,025
0,487	0,545	0,69	0,802	0,88	0,93	0,0114	0,018
0,378	0,422	0,535	0,622	0,68	0,72	0,0087	0,014
0,299	0,334	0,596	0,492	0,54	0,57	0,0069	0,011
0,242	0,270	0,342	0,398	0,44	0,46	0,0056	0,009
0,20	0,224	0,282	0,329	0,36	0,38	0,0046	0,007
0,155	0,173	0,219	0,255	0,28	0,295	0,0036	0,006
0,123	0,138	0,174	0,203	0,222	0,235	0,0029	0,005
0,1075	0,120	0,152	0,177	0,194	0,205	0,0025	0,004
0,0868	0,099	0,126	0,146	0,160	0,170	0,0021	0,003
0,0790	0,088	0,112	0,130	0,143	0,152	0,0018	0,0029

3. lackisolierte und ein- und mehrfach umsponnene Kupfer-Runddrähte in DIN 46 436, Bl. 2,

4. ein- und mehrfach mit Seide oder Baumwolle umsponnene Widerstandsdrähte WM 43, WM 50 und WM 100 in DIN 46 462 (die Werte entsprechen DIN 46 436, Bl. 1).

Auch Aluminiumdrähten können diese Isolationsauftragsarten und -abmessungen zugrundegelegt werden.

Für die Größe eines Leiterquerschnittes ist entweder der zulässige Spannungsabfall oder die zulässige Erwärmung bestimmend. Während sich der Gleichspannungsverlust in einer Leitung aus $U = I \cdot R = I \cdot \varrho/F = I \cdot R'$ ermitteln läßt, erfordern die Rücksichten auf die zulässige Erwärmung der Leitung für jeden Querschnitt eine bestimmte höchstzulässige Stromstärke. Diese ist jedoch nicht nur von der Größe der abkühlenden Leiteroberfläche und des wärmeableitenden Leiterquerschnittes, sondern auch von der Dauer der Belastung, der Art der Leitungsverlegung, der Wickelart (einlagig, mehrlagig, große oder kleine Windungssteigung usw.) und bei isolierten Leitungen von Isolationsart und -stärke abhängig. Die früher für blanke und in ruhiger Luft von 20° C frei ausgespannte Drähte durch Versuch im Dauerbetrieb ermittelten Strombelastungswerte, bezogen auf eine bestimmte Drahttemperatur, haben keine praktische Bedeutung erlangen können, weil die Wärmeabgabefähigkeit frei ausgespannter Drähte sehr groß ist, sich andererseits bei praktisch ausgeführten Widerständen mit steigender Behinderung der Wärmeabfuhr erhebliche Abweichungen ergaben.

Die Ermittlung der zulässigen Strombelastungen von Kupfer- und Aluminiumdrähten ist im allgemeinen mit Hilfe der Stromdichte S, also der Stromstärke pro mm² Leitungsquerschnitt, üblich. So beträgt z. B. die zulässige Stromdichte für Netztransformatoren $S = 1{,}5 \ldots 2{,}5$ A/mm² und für Tonfrequenztransformatoren $S = 1{,}0 \ldots 1{,}5$ A/mm². Der Drahtdurchmesser errechnet sich in diesem Falle aus

$$d = k \cdot \sqrt{I} \quad [\text{mm}] \qquad (12)$$

Hierin ist I die Stromstärke [A] und k eine Konstante, die in Abhängigkeit von S folgender Tafel zu entnehmen ist:

S [A/mm²]:	1	2	2,55	3	4	5
k :	1,113	0,798	0,707	0,652	0,564	0,505

Für den Widerstandsbau ist Gleichung (12) nicht geeignet, da sie im Bereich der im Gerätebau viel gebrauchten kleinen Drahtdurchmesser von 0,03...3 mm erfahrungsgemäß zu geringe Strombelastungswerte ergibt. In diesen Fällen hat sich folgende Erfahrungsformel als zweckmäßig erwiesen:

$$I_{max} = 0{,}94 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{d}{\varrho_\vartheta}} \quad [A] \qquad (13)$$

Bei isolierten Drähten muß in der Belastung auf die Grenztemperatur des Isolierstoffes Rücksicht genommen werden. Sie beträgt für

Lack	80...90° C
Baumwolle, ungetränkt	85° C
Baumwolle, getränkt	90° C
Seide	100° C

In Abweichung von der in 1.2 behandelten Oberflächentemperatur von Widerstandskörpern erfordern diese Rücksichten hier eine höchstzulässige Temperatur an der Oberfläche des Drahtes selbst und damit für jeden Querschnitt der Leitung eine bestimmte höchstzulässige Stromstärke.

Beispiel 8: Es ist die zulässige Strom- und Wattbelastung eines Widerstandes von $R = 100\ \Omega$ mit seideisoliertem Konstantandraht von $d = 1$ mm Durchmesser zu ermitteln.

Die Grenztemperatur für Seide ist $\vartheta_{max} = 100°\,C$ und der spezifische Widerstand von Konstantan nach Tafel 2a $\varrho_{\vartheta_0} = 0{,}5\ \Omega mm^2/m$ ($\vartheta_0 = 20°\,C$). Die Widerstandsabnahme beträgt für Konstantan $\alpha = -0{,}03 \cdot 10^{-3}\ °C^{-1}$, so daß nach Gleichung (9b) $\varrho_\vartheta = \varrho_{\vartheta_0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] = 0{,}5 \cdot [1 - 0{,}03 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)] = 0{,}4988\ \Omega mm^2/m$. Damit ist nach Gleichung (13) die höchstzulässige Strombelastung

$$I_{max} = 0{,}94 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{d}{\varrho_\vartheta}} = 0{,}94 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{1}{0{,}4988}} = 1{,}3\ A$$

(Im Vergleich hierzu ist für einen frei ausgespannten blanken Konstantandraht WM 50 von 1 mm Durchmesser bei einer Oberflächentemperatur von 100° C $I_{max} = 4$ A).

Die zulässige Wattbelastung ist dann

$$N_z = I^2_{max} \cdot R = 1{,}3^2 \cdot 100 = 169\ W.$$

III. Der Drahtwiderstand

1. Die Belastbarkeit der Drahtwiderstände

Drahtgewickelte Widerstände eignen sich insbesondere dort zum Einsatz, wo hohe elektrische Leistungen aufgenommen werden müssen, wie das z. B. bei Vorschalt-, Regel-, Spannungsteilerwiderständen usw. der Fall ist. Ihre spezifische Belastungsfähigkeit N'_z [W/cm²] beträgt ein mehrfaches der von Schichtwiderständen, da Drahtwiderstände eine höhere Oberflächentemperatur vertragen. Die Belastbarkeit von Drahtwiderständen wird im wesentlichen durch die Warmfestigkeit der Oberfläche bestimmt. Bei ihrem Einbau in ein Gerät muß daher auch darauf geachtet werden, daß sie sich nicht in der Nähe wärmeempfindlicher Teile befinden und daß durch gute Wärmeableitung Wärmestauungen, insbesondere in der Nähe von Spulen, vergossenen Kondensatoren usw., vermieden werden.

Nach der Beschaffenheit der Oberfläche wird unterschieden:

1. offen gewickelte Drahtwiderstände,
2. lackierte Drahtwiderstände,
3. zementierte Drahtwiderstände und
4. glasierte Drahtwiderstände.

Offen gewickelte und lackierte Drahtwiderstände dürfen nach DIN 41 410 am wärmsten Punkt eine Oberflächentemperatur von $\vartheta'_{max} = 170°$ C, bezogen auf eine Raumtemperatur $\vartheta_0 = 20°$ C, nicht überschreiten. Für lackierte Drahtwiderstände wird diese Temperaturgrenze durch die Warmfestigkeit des Lackes bestimmt. Offen gewickelte Drahtwiderstände vertragen zwar meist wesentlich höhere Temperaturen als 170° C, können sich aber bei stärkerer Erwärmung u. U. so weit ausdehnen, daß der Draht sich vom Wickelkörper abhebt und Windungsschluß eintritt. Während offen gewickelte Drahtwiderstände meist mit oxydiertem Draht als Isolationsschicht Windung an Windung (Konstante der Windungssteigung k = 1) gewickelt werden, werden lackierte Drahtwiderstände mit blankem Draht, aber mit Zwischenraum zwischen den einzelnen Wicklungen gewickelt, so daß der Lack zwischen die Windungen eindringen und jede Windung auf dem Wickelkörper festlegen kann. Als spezifischer Belastungswert, d. i. die Belastung pro cm² Oberfläche des Widerstandes, gilt für

$$\vartheta_{max} = 170° \text{ C } N'_z = 0{,}27 \text{ W/cm}^2 \text{ für } \vartheta_{max} - \vartheta_0 = 150° \text{ C}.$$

Beispiel 9: Ein Drahtwiderstand mit einem Wickelkörper von D = 16 mm Durchmesser und L = 75 mm Länge, d. i. mit einer Oberfläche

$$F = D \cdot \pi \cdot L = 1{,}6 \cdot 3{,}14 \cdot 7{,}5 = 37{,}5\ \text{cm}^2$$

erwärmt sich dann an seiner heißesten Stelle auf 170° C, wenn er bei $\vartheta_0 = 20°$ C mit

$$N_n = F \cdot N'_z = 37{,}5 \cdot 0{,}27 = 10\ \text{W}$$

belastet wird. Ein Kohleschichtwiderstand gleicher Größe darf sich bei $\vartheta_0 = 20°$ C nach DIN 41 406 an seiner heißesten Stelle vergleichsweise nur auf 110° C erwärmen und erreicht diese Temperatur bei einer Belastung mit $N_n = 6$ W.

Offen gewickelte und lackierte Drahtwiderstände sind mit ihren Hauptbaumaßen und Anschlußarten (Draht-, Fahnen- oder Schellenanschluß) in folgenden Nennleistungswerten genormt worden:

0,5 W (DIN 41 411); 1 W (DIN 41 412); 2 W (DIN 41 413); 4 W (DIN 41 415); 6 W (DIN 41 416); 12 W (DIN 41 418); 25 W (DIN 41 420); 50 W (DIN 41 423).

Zementierte Drahtwiderstände besitzen eine Zementschicht ähnlich den Zahnzementen und vertragen eine Oberflächentemperatur von

$\vartheta_{max} = 350°$ C wobei $N'_z = 0{,}8$ W/cm² für $\vartheta_{max} - \vartheta_0 = 330°$ C.

Ein Drahtwiderstand mit den Abmessungen des Beispieles 9 erreicht dann bei etwa $N_n = 30$ W die Oberflächentemperatur $\vartheta_{max} = 350°$ C. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß Widerstände mit Lötanschluß nicht über 300° C erwärmt werden dürfen, weil sonst die Lötverbindung schmilzt. Eine gleiche Einschränkung besteht für zementierte Widerstände mit einstellbarer Abgreifschelle, da es notwendig ist, den auf der Abgreifbahn freiliegenden Draht zu schützen. Bei ungünstigen Betriebsbedingungen, wie z. B. höherer Umgebungstemperatur als 20° C durch gedrängten Einbau oder benachbarte wärmeabgebende Bauteile, ist eine weitere Senkung der Belastung notwendig (siehe Deratingkurven Bild 3).

Glasierte Drahtwiderstände lassen bei einer Umgebungstemperatur $\vartheta_0 = 25°$ C nach DIN 41 430 eine noch wesentlich höhere Oberflächentemperatur und damit spezifische Belastung zu, und zwar nach der Warmfestigkeit der Glasur

Klasse B: $\vartheta_{max} = 450°\,C$, $N'_z = 1{,}3\ W/cm^2$ für $\vartheta_{max} - \vartheta_o = 425°\,C$
Klasse A: $\vartheta_{max} = 550°\,C$, $N'_z = 1{,}8\ W/cm^2$ für $\vartheta_{max} - \vartheta_o = 525°\,C$.

Ein Drahtwiderstand mit den Abmessungen des Beispieles 9 würde dann bei $N_n = 50$ W die Temperatur $\vartheta_{max} = 450°\,C$ und bei $N_n = 70$ W die Temperatur $\vartheta_{max} = 550°\,C$ erreichen. Für Widerstände mit weich gelöteten Schellen- oder Drahtanschlüssen oder mit einstellbaren Schellen gilt auch hier die Beschränkung der Oberflächentemperatur auf 300° C.

Voraussetzung für die angeführten Oberflächentemperaturen und spezifischen Belastungswerte ist, daß die Widerstände fest, einlagig und nicht induktionsfrei gewickelt, nicht angezapft und nicht einstellbar, weiterhin bei einer Raumtemperatur $\vartheta_o = 20°$ bzw. 25° C waagerecht frei aufgehängt sind. Bei höherer Umgebungstemperatur ϑ_o steigt in gleichem Maße auch die Oberflächentemperatur. Bei Überschreiten der höchstzulässigen Raumtemperatur ist es notwendig, die Widerstände durch verstärkte Luftzirkulation zu kühlen oder ihre Belastung zu senken. Auf welchen Betrag N_z die Nennleistung N_n gesenkt werden muß, ist aus den Deratingkurven (Bild 2 und 3) ersichtlich. Für glasierte Drahtwiderstände nach DIN 41 430 werden z. Z. die Belastungswerte N_n in Abhängigkeit von den Baugrößen der Widerstände (Länge/Durchmesser) in DIN 41 431...41 441 und DIN 41 446 festgelegt. Sie umfassen einen Bereich von 2...600 W. Zu beachten ist, daß bei diesen hochbelastbaren Widerständen in Abhängigkeit von ihrer Baugröße höchstzulässige Betriebsströme I_{zmax} und Betriebsspannungen U_{zmax} zur Vermeidung von Spannungsüberschlägen nicht überschritten werden dürfen. Werte hierfür sind in den oben genannten DIN enthalten.

Beispiel 10: Für glasierte Drahtwiderstände der Größe 30/6,5 nach DIN 41 432 sind festgelegt: $N_n = N_z = 4$ W, $I_{zmax} = 0{,}63$ A und $U_{zmax} = 130$ V. Die zu bevorzugenden Widerstandswerte liegen zwischen $R = 10\ \Omega$ und $R = 8\ k\Omega$. Aus den beiden Gleichungen (8 a und b) ist erkennbar, daß sich kleine R-Werte auf I_z, große R-Werte auf U_z steigernd auswirken. Für den Widerstandsbereich ergeben sich folgende Grenzwerte:

$$R = 10\ \Omega:\ I_z = \sqrt{\frac{N_z}{R}} = \sqrt{\frac{4}{10}} = 0{,}63\ A$$

$$U_z = \sqrt{N_z \cdot R} = \sqrt{4 \cdot 10} = 6{,}3\ \text{V}$$

$$R = 8\ \text{k}\Omega\text{:}\quad I_z = \sqrt{\frac{4}{8000}} = 22\ \text{mA}$$

$$U_z = \sqrt{4 \cdot 8000} = 180\ \text{V}$$

Während bei R = 10 Ω der Wert I_{zmax} = 0,63 A gerade erreicht wird, überschreitet bei R = 8 kΩ der Wert U_z = 180 V den höchstzulässigen Wert U_{zmax} = 130 V. Die Belastung muß daher von N_n = 4 W auf N_z = 2 W gesenkt werden. Es ist dann

$$U_{zmax} = \sqrt{2 \cdot 8000} = 127\ \text{V}$$

In der Reihe der Widerstandswerte ist erst von R = 4 kΩ ab $N_n = N_z$ = 4 W. Die Belastung hoher Widerstandswerte wird somit durch die höchstzulässige Betriebsspannung U_{zmax} eingeengt.

Der zementierte Drahtwiderstand hat vor dem glasierten den Vorzug, billiger zu sein und eine engere Toleranz des Widerstandswertes zu erreichen, da er den bei hoher Temperatur vor sich gehenden Glasurschmelzvorgang nicht durchzumachen braucht.

Rohrfestwiderstände und Rohrschiebewiderstände, beide mit Drahtwicklung, sind in DIN 41 481 und DIN 41 482 mit ihren Baumaßen (Rohrdurchmesser von 30...120 mm, Rohrlängen von 160...800 mm), ihren Mindestwiderstandswerten (Toleranz +30%) und ihrer höchstzulässigen Dauerstromstärke festgelegt worden. Sie umfassen einen Bereich von 0,1...57 100 bzw. 33 100 Ω pro Rohr und lassen sich in einem entsprechenden Halter auch zu Zweirohrwiderständen mit doppeltem Widerstandswert zusammenschalten. Als Widerstandsdraht dient vorzugsweise Material WM 50. Die Wicklung wird normal Draht an Draht oder speziell als abgestufte, als induktions- und kapazitätsarme Wicklung, als Bandwicklung, als Wicklung mit Abstand zwischen den Nachbarwindungen (Sperrwicklung), als Wicklung mit Ausschaltstellung usw. ausgeführt. Für die Oberflächenbelastung sind in DIN 41 480 folgende Werte festgelegt:

Drahtdurchmesser	d:	0,1	0,3	0,5	≧ 1 mm
Schieberohrwiderstände	N'_z:	0,5	0,55	0,57	0,6 W/cm²
Festrohrwiderstände	N'_z:	0,7	0,75	0,77	0,8 W/cm²

Diese Werte gelten für waagerechte Gebrauchslage bei natürlicher Luftkühlung mit ungehindertem Luftzutritt, einer Umgebungstemperatur $\vartheta_u = 35^\circ$ C und Dauerlast. Bei senkrechter Gebrauchslage ist eine Erhöhung um 10 %, bei intermittierendem oder kurzzeitigem Betrieb eine Erhöhung je nach Betriebsverhältnissen zulässig. Andererseits sind diese Werte bei eingebauten Widerständen allgemein um 20 % und bei Umgebungstemperaturen $\vartheta_u > 35^\circ$C entsprechend dem Temperaturunterschied zu senken.

Für die *Selbstherstellung von Rohrwiderständen mit Drahtwicklung* stehen in DIN 41 483 keramische Rund- und Profilrohre mit den Durchmessern 30, 40, 60 bzw. 28,5, 38 und 57 mm und mit Längen von 160, 200, 300, 400, 500 und 600 mm zur Verfügung. Der Drahtdurchmesser läßt sich hierfür allgemein aus folgender Erfahrungsformel ermitteln:

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \varrho \cdot N}{10 \cdot \pi \cdot N'_z \cdot k \cdot R}} \quad [\text{mm}] \qquad (14)$$

Hierin bedeuten außer den bereits bekannten Formelzeichen

d = Durchmesser des Widerstandsdrahtes in mm,
N = aufzunehmende Betriebslast in W,
k = Konstante der Windungssteigung h.

Die Konstante k ergibt sich aus der Windungssteigung $h = k \cdot d$ als Vielfaches des Drahtdurchmessers d. Für eng gewickelte Widerstände, bei denen Windung an Windung liegt (z. B. bei oxydierten Drähten), also $h = d$, ist $k = 1$. Mit wachsendem h steigt auch k. So wird z. B. $k = 2$, wenn $h = 2\,d$. k ist in Gleichung (14) zunächst überschläglich anzunehmen.

Beispiel 11: Es ist ein fester Rohrwiderstand mit einlagiger Drahtwicklung und einem Widerstandswert $R = 2{,}5$ kΩ für eine Belastung von $N = 200$ W zu berechnen. Als Drahtmaterial wird aus Tafel 2c ein eisenhaltiger Chromnickeldraht (CrNiFe II oder Cekas) mit einem $\varrho = 1.12\ \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ und einem $\alpha = +0.13 \cdot 10^{-3}\,^\circ\text{C}^{-1}$ gewählt. Die Konstante k wird mit 1,1 angenommen. Für einen offen gewickelten Rohrfestwiderstand nach DIN 41 481, dessen Drahtdurchmesser voraussichtlich größer als 0,1 mm sein wird, müßte $N'_z = 0{,}75\ \text{W/cm}^2$ genommen werden. Da aber angenommen sein soll, daß der Widerstand nur intermittierend belastet wird, und zwar so, daß er je zur

Hälfte in und außer Betrieb ist und sich in den Betriebspausen völlig abkühlen kann, so kann die spezifische Belastung doppelt so hoch, und zwar mit $N'_z = 1{,}5$ W/cm² genommen werden. Nach Gleichung (14) ist dann der Drahtdurchmesser

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \varrho \cdot N}{10 \cdot \pi \cdot N'_z \cdot k \cdot R}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1{,}12 \cdot 200}{10 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}5 \cdot 1{,}1 \cdot 2500}} = 0{,}19 \text{ mm}$$

Da dieser Durchmesser nach DIN 46 462 nicht normgerecht ist, wurde gewählt

$$d = 0{,}2 \text{ mm}.$$

Nach Tafel 3 hat dieser Durchmesser einen Meterwiderstand $R' = 34{,}2$ Ω/m. Steht ein Widerstandsträger mit einem Durchmesser $D = 30$ mm zur Verfügung, so beträgt die Länge einer Windung

$$l_1 = \pi \cdot (D + d) = 3{,}14 \cdot (30 + 0{,}2) = 95 \text{ mm} = 0{,}095 \text{ m}$$

Der Widerstand einer Windung ist

$$r_1 = R' \cdot l_1 = 34{,}2 \cdot 0{,}095 = 3{,}25 \text{ Ω}$$

Es erhält daher der Widerstand eine Windungszahl von

$$n = \frac{R}{r_1} = \frac{2500}{3{,}25} = 770 \text{ Windungen}$$

Bei der Steigungskonstanten $k = 1{,}1$ beansprucht der Widerstand eine freie Widerstandslänge zwischen den Anschlußschellen von

$$L_w = n \cdot k \cdot d = 770 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}2 = 170 \text{ mm}$$

Es wäre somit eine Rohrlänge $L = 200$ mm ausreichend. Die erforderliche Drahtlänge bestimmt sich aus

$$L_d = l_1 \cdot n = 0{,}095 \cdot 770 = 73{,}2 \text{ m}$$

Die Kontrollrechnung ergibt einen Widerstandswert

$$R = L_d \cdot R' = 73{,}2 \cdot 34{,}2 = 2500 \text{ Ω}$$

für eine Belastung von

$$N = l_1 \cdot L_w \cdot N'_z = 9{,}5 \cdot 17 \cdot 1{,}5 = 240 \text{ W}$$

Mehrlagige Feindraht-Festwiderstände sind mit Spulenkörpern nach DIN 41 528 bei voller Ausnutzung des Wickelraumes in folgenden Widerstands- und Belastungswerten herstellbar:

Größe Nr.	Wickelraum cm³	größter Widerstand bei Drahtdurchmesser 0,03 mm kΩ	0,05 mm kΩ	Belastbarkeit W
1	0,8	30	6	0,5
1,5	1	60	12	0,7
3,5	3	200	35	1
7	6,5	500	80	1,5
16	15	1000	200	2

2. Die Genauigkeit der Drahtwiderstände

Für die Genauigkeit *offen gewickelter und lackierter Drahtwiderstände* werden nach DIN 41 410 zwei Klassen unterschieden, nämlich 0,5 und 2, wobei die Klassenbezeichnung der zulässigen Widerstandsänderung in % bei Lagerung und Belastung entspricht. Entsprechend diesen beiden Klassen sind bei einer Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20°\,C$ folgende Prüf- und Gütewerte festgelegt worden:

		Klasse 0,5	2
Toleranz (Auslieferungstoleranz, Abweichung vom Nennwert) in %	normal:	± 5	± 10
	eingeengt:	± 2, ± 1	± 5
Temperaturbeiwert $\alpha \cdot 10^3\ {}^0C^{-1}$ (Mittelwert zwischen 20° und 150° C)		0,1	1
zulässige Widerstandsänderung in %			
a) nach Lagerung unbelastet 5000 h bei $\vartheta_0 = 20°\,C \pm 5°$ und höchstens 60 % relativer Luftfeuchte		insgesamt ± 0,5	± 2
b) nach Lagerung belastet 5000 h mit N_n waagerecht frei aufgehängt bei $\vartheta_0 = 20°\,C \pm 5°$			

Für *glasierte Drahtwiderstände* sind in DIN 41 430 folgende Prüf- und Gütewerte festgelegt worden:

Toleranz (Auslieferungstoleranz, Abweichung vom Nennwert) in %	normal:	± 10
	eingeengt:	± 5, ± 3

Temperaturbeiwert $\alpha \cdot 10^3$ °C^{-1} (Mittelwert zwischen 20° und 300° C)	$\geq +0{,}5$
zulässige Widerstandsänderung in %	
a) nach Lagerung unbelastet 5000 h bei $\vartheta_0 = 25°$ C $\pm 5°$ und höchstens 75 % relativer Luftfeuchte	+ 2
b) nach 5000 h Belastung mit N_n im Widerstandsbereich zwischen I_{zmax} und U_{zmax}	+ 4
c) nach 5 h Überlastung mit 20%iger Steigerung von N_n (Berücksichtigung von I_{zmax} für den unteren und von U_{zmax} für den oberen Widerstandsbereich)	± 3
d) nach Feuchteprüfung (7, 28 und 84 Tage bei $\vartheta_0 = 30°$ C $\pm 2°$ und 85 bis 90 % relativer Luftfeuchte)	± 2
e) nach Tropenprüfung (100 h bei $\vartheta_0 = 50°$ C $\pm 2°$ und 95 % ± 3 % Luftfeuchte)	± 3
f) nach Temperatursturz (Aufheizen mit N_n und unmittelbar nach Abschalten 15 min in Umgebungstemperatur von $-55°$ C $\pm 5°$)	± 2

Die Konstanz und Stabilität der Widerstandswerte von Drahtwiderständen hängt wesentlich von den Eigenschaften der verwendeten Drähte ab. Die Tafeln 2 a und 2 c enthalten geeignete Widerstandswerkstoffe, wobei die Kupferlegierungen der Tafel 2 a sich besonders für niederohmige Widerstände eignen, weil ihre spezifischen Widerstände etwa nur halb so groß sind wie die der Chrom-Nickel-Legierungen der Tafel 2 c. Auch der TK der Kupferlegierungen (Tafel 2 a, Gruppe 2 und 3) ist geringer als der von Chromnickeldrähten, so daß Widerstände mit z. B. Konstantandraht der Klasse 0,5 DIN 41 410 entsprechen. Im Gegensatz zu Chromnickeldrähten sind Konstantandrähte nicht für glasierte Widerstände verwendbar, da sie bei den hohen Einbrenntemperaturen der Glasur verzundern. Dagegen werden die bei zementierten Widerständen auftretenden Temperaturen bei 350° C von Konstantan ohne Schaden vertragen, da nach Tafel 2 a seine höchstzulässige Gebrauchstemperatur 400 °C beträgt.

Der TK ist wohl bei offen gewickelten und lackierten, dagegen nicht in jedem Falle bei zementierten und glasierten Widerständen gleich dem TK des aufgebrachten Drahtes, da die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Wickelkörper und Oberflächenschutzschicht eine temperaturabhängige Lageänderung des Drahtes bewirken können. Als Richtwerte können aber aus Bild 4 für die Berechnung von Widerständen die prozentualen Änderungen des Widerstandswertes von Chromnickel- und Konstantandrähten mit der Drahttemperatur entnommen werden. Während bei Raumtemperatur der Widerstandswert stets innerhalb der festgelegten Toleranzwerte liegt, ist es möglich, daß z. B. ein glasierter Widerstand mit Chromnickeldraht und der eingeengten Auslieferungstoleranz von ± 3 % bei Erwärmung auf 400° C mehr als ± 3 %, nämlich nach Bild 4 ± 4,5 % vom Nennwert abweicht.

Die hohe Konstanz des Widerstandswertes von Drahtwiderständen läßt oft eine möglichst enge Auslieferungstoleranz er-

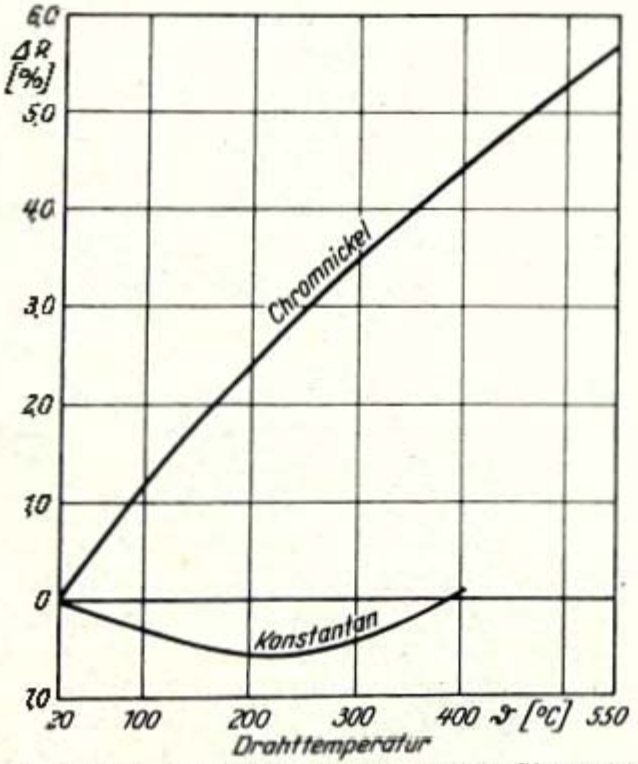


Bild 4. Änderung des Widerstandswertes von Chromnickel- und Konstantandrähten mit der Temperatur

wünscht erscheinen. Diesem Bestreben sind jedoch dadurch Grenzen gesetzt, daß wegen des symmetrischen Aufbaus der Anschlußarmaturen die Wicklung an beiden Seiten des Widerstandes stets mit einer vollständigen Windung abschließen muß. Im ungünstigsten Falle wird also eine halbe Windung zuviel oder zuwenig aufgewickelt. Die Mindesttoleranz ist somit windungszahlabhängig und mit folgender Gleichung zu ermitteln

$$T_{amin} = \frac{100}{2 \cdot w} = \frac{50}{w} \quad [\%]$$

Hierin ist w = Windungszahl.

Bei zementierten und insbesondere bei glasierten Widerständen wird die Höhe der Mindesttoleranz auch durch eine kristalline Umformung des Drahtes beeinflußt, die als Folge der hohen Einbrenntemperaturen eintritt. Bleibende Widerstandsänderungen (z. B. durch Alterung) lassen sich dagegen stets in den zulässigen Grenzen halten. Unter schwierigen klimatischen Verhältnissen ist es zweckmäßig, glasierte Widerstände zu verwenden, bei denen auch die Anschlußarmaturen unter Glasur liegen, auch dann, wenn von der möglichen hohen Belastung nicht in vollem Umfang Gebrauch gemacht wird.

Die Verwendung von Drahtwiderständen, insbesondere der hochbelastbaren und hochohmigen zementierten und glasierten, in Wechsel- oder Gleichstromkreisen ist vom Material des Wickelkörpers abhängig. Während für den Einsatz in Wechselstromkreisen Wickelkörper aus normalem technischen Porzellan (Typ 110 DIN 40 685) genügen, sind für den Einsatz in Gleichstromkreisen Wickelkörper aus Steatit (Typ 220), Frequenta (Typ 221) o. ä. erforderlich. Bei normalen Porzellankörpern besteht in Gleichstromkreisen die Gefahr einer elektrolytischen Reaktion und damit eines korrodierenden Einflusses auf den dünnen Widerstandsdraht, die bei Wechselstrom wegen des ständigen Stromwechsels bedeutungslos und daher nicht zu befürchten ist.

Zur Erreichung hoher Widerstandswerte sind nach Gleichung (1) sehr geringe Drahtdurchmesser und große Drahtlängen erforderlich. Die Grenzen sind gesetzt durch den kleinsten herstellbaren Drahtdurchmesser und die größte aufbringbare Drahtlänge. Wenn es auch gelungen ist, einen Draht von nur 0,007 mm Durchmesser herzustellen ($R' = 30\,000\ \Omega/m$), so wer-

den doch für Drahtwiderstände keine geringeren Drahtdurchmesser als 0,04 bis höchstens 0,03 mm verwendet, da mit geringer werdendem Durchmesser die Korrosionsgefahr wächst und die Lebensdauer bei zeitweiliger Überlastung sinkt. Auch sind Drähte mit kleinerem Durchmesser als 0,03 mm oft ungleich dick und haben keinen kreisförmigen Querschnitt. Aus diesem Grunde werden daher auch Drahtwiderstände nur bis zu Widerstandswerten von etwa 100 kΩ hergestellt.

Ein besonderes Problem ist die einwandfreie Kontaktierung, d. i. die Herstellung einer guten Dauerkontakt gebenden Verbindung zwischen dem Widerstandsdraht und den Anschlußarmaturen. Hierbei muß nicht nur eine Widerstandsvergrößerung durch zusätzliche Übergangswiderstände infolge schlechter Kontaktgabe vermieden, sondern auch eine sperrschichtfreie Anbringung der Anschlüsse erreicht werden, da anderenfalls bei Wechselströmen eine Gleichrichterwirkung und bei Gleichströmen ein von der Stromrichtung abhängiger Widerstand die Folge ist. Die Schwierigkeiten wachsen mit geringer werdendem Drahtdurchmesser (insbesondere in der Massenfertigung) und mit steigender Belastung und damit steigender Erwärmung und Materialausdehnung. Deshalb sind auch Klemmkontaktierungen und Lötungen bei Drähten unter 0,1 mm Durchmesser nicht ratsam. Durch ein geeignetes Schweißverfahren, das bei der Herstellung zementierter und glasierter Widerstände Anwendung findet, konnten diese Schwierigkeiten überwunden werden.

3. Induktions- und kapazitätsarme Wicklungsarten

Sollen drahtgewickelte Widerstände auch im Wechselstromkreis Verwendung finden, so müssen sie in besonderen Fällen, z. B. für Meßzwecke, induktions- und kapazitätsarm sein. Induktion ist immer dann vorhanden, wenn der Strom im Leiter ein magnetisches Feld erzeugen kann. Dies wird verhindert durch die bifilare oder Gegenwicklung (**Bild 5 a**). Sie entsteht

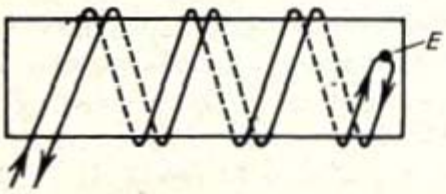


Bild 5a. Bifilare Wicklung (induktionsarm)

im einfachsten Falle dadurch, daß man zwei Drähte zusammen aufwickelt und die entstehenden zwei Wicklungen so verbindet, daß der Strom in entgegengesetzter Richtung durch sie hindurchfließt. Hierbei hebt dann die magnetisierende Wirkung der einen Spule die der anderen auf.

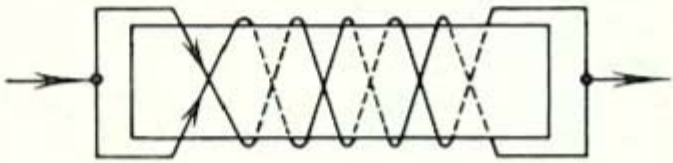


Bild 5b. Kreuzwicklung (induktionsarm)

Die gleiche Wirkung erzielt man mit der Kreuzwicklung (**Bild 5 b**), bei der von einem Ende des Widerstandes aus zwei getrennte Wicklungen aufgebracht werden, die im entgegengesetzten Sinne umlaufen. Auch hier treten beim Stromdurchgang zwei gleichgroße magnetische Felder entgegengesetzter Polarität auf, die sich gegenseitig aufheben.

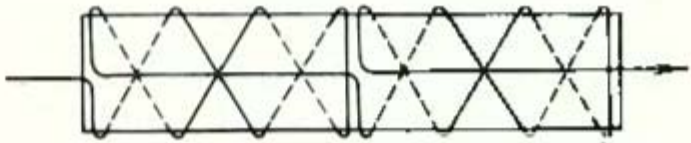


Bild 5c. Gekreuzte Gegenwicklung (induktions- und kapazitätsarm)

Von Kapazität spricht man, wo eine Ladung oder ein elektrisches Feld auftritt. Bei einem Drahtwiderstand ist das dort der Fall, wo benachbarte Drähte ein verschiedenes Potential besitzen. Die Kapazität ist gering bei einfacher Lage, nimmt aber mit der Anzahl der Lagen erheblich zu. Sie ist auch bei bifilarer Wicklung vorhanden. Insbesondere nimmt die Ladungskapazität zwischen den dicht nebeneinander liegenden und teilweise auf großem Spannungsunterschied befindlichen Drahthälften großer Vorschalt- und Regelwiderstände beträchtliche Werte an. Infolgedessen sind bifilare Meßwiderstände oberhalb 100 Ω und technische Widerstände mit hohem Spannungsabfall oberhalb 500 Ω nicht mehr genügend kapazitätsfrei. Solche Widerstände werden daher nach Chaperon so gewikkelt, daß eine Lage normal (unifilar), die nächste aber im umgekehrten Sinne

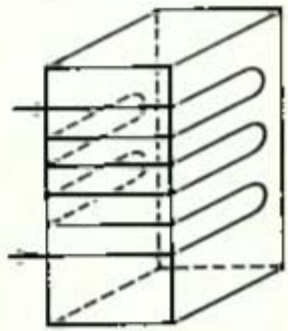


Bild 5d. Mäander-Wicklung (kapazitäts- und induktionsarm)

zurückgewickelt wird. Eine Abart dieser Wicklung ist die gekreuzte Gegenwicklung, deren Wickelschema Bild 5c zeigt. Sie bietet den Vorteil der bifilaren Wicklung und gleichzeitig den, daß das Nebeneinanderliegen von Drähten, die große Spannungsdifferenz gegeneinander haben und infolgedessen große Kapazitätswirkung zeigen, vermieden wird. Im Meßgerätebau hat sich schließlich noch die Mäanderwicklung (Bild 5d) bewährt, bei der die bifilare Wicklung in kurzen Lagen ausgeführt, also die ganze Wicklung in kleine Abteilungen zerlegt wird. Auch hierdurch lassen sich Induktions- und Kapazitätserscheinungen herabsetzen.

IV. Der Schichtwiderstand

1. Arten und Aufbau der Schichtwiderstände

Während in anderen Ländern, insbesondere den USA, neben Schichtwiderständen auch Massewiderstände (Vollkörper aus einem Gemisch von leitenden und nicht leitenden Stoffen) im Gebrauch sind, haben sich in Deutschland nur die ersteren eingeführt, wobei folgende drei Arten von Widerstandsschichten unterschieden werden:

1. Kristallkohleschicht,
2. Kolloidkohleschicht,
3. Metallschicht.

Nach dem Karbowid- oder Chemocarbonverfahren wird eine Schicht aus kristalliner Grauglanzkohle als Widerstandsschicht dadurch hergestellt, daß im Vakuum oder bei normalem Druck in einem inerten Gas (Stickstoff) bei hoher Temperatur (> 800° C) ein flüssiger Kohlenwasserstoff (Benzol, Heptan, Petroläther oder Gemisch dieser) zerlegt und auf einen Widerstandsträger aus Spezialporzellan niedergeschlagen wird. Kohleschicht und Träger werden hierbei unlösbar miteinander verbunden. Je nach Höhe des geforderten Widerstandswertes ist die Schicht 10^{-2}...10^{-4} mm dick. Ein bestimmter Mindestwert der Schichtdicke muß eingehalten werden, damit die mechanische Stabilität und elektrische Konstanz der Schicht erhalten bleibt. Diese geringste Schichtdicke bestimmt in Verbindung mit dem spezifischen Widerstand für kristalline Glanzkohle $\varrho = 40\ \Omega mm^2/m$ den höchsten Widerstandswert, der auf einem

Träger bestimmter Größe untergebracht werden kann. Er ist verhältnismäßig niedrig und liegt zwischen einigen Ω und etwa 10 kΩ. Dieser Vorwert läßt sich jedoch durch Einschleifen einer spiraligen Wendel als Trennungsnut in die ursprünglich zylindrische Widerstandsschicht etwa im Verhältnis 1 : 1000 erhöhen, wobei unter gleichzeitiger elektrischer Widerstandskontrolle der auftrennende Schliff bis zum Erreichen eines bestimmten Widerstandswertes ausgedehnt wird. So kann z. B. aus einem Vorwert von 1 kΩ durch Wendeln ein Endwert von 1 MΩ entstehen. Die Konstanz der elektrischen Werte einer Kristallkohleschicht wird durch ihre physikalische Struktur bestimmt, wobei nicht nur der Härtegrad, sondern auch Homogenität im Hinblick auf Kristallablagerung, Kristallgröße und Schichtdicke von Bedeutung sind.

Für Hochtemperaturzwecke, also für hochbelastbare Kohleschichten, hat der Polymerkohlenstoff große Bedeutung erlangt. Er wird durch stufenweises Erhitzen von Polyvinylbenzol auf 1050° C gewonnen, wobei Wasserstoff entweicht und ein Kohlenstoff sehr großer Reinheit entsteht, der in Kugelform eine netzartige Struktur besitzt und in seinen Eigenschaften zwischen Diamant und Grafit liegt.

Höhere und höchste Widerstandswerte sind mit Kolloidkohleschichten erreichbar dadurch, daß je nach Höhe des Widerstandswertes eine größere oder geringere Menge leitender Kohlenstoffteilchen in einem nicht leitenden Lack kolloidal gelöst, auf den Widerstandsträger aufgetragen und eingebrannt wird. Die für die Herstellung von Kolloidkohleschichten verwendeten leitenden Stoffteilchen bestehen aus chemisch reinem Kohlenstoff in seinen zahllosen Modifikationen (beachte z. B. Diamant, Anthrazit, Retortenkohle, Grafit, Ruß). Je härter der Kohlenstoff ist, desto schlechter ist sein Leitvermögen. Die weichen Modifikationen Ruß und Grafit sind daher relativ gute Leiter, Retortenkohle wiederum hat einen anderen TK als Ruß usw. Auf diesem Wege lassen sich Kolloidkohleschichten mit Widerstandswerten von 1 Ω...10^{13} Ω und für Betriebsspannungen bis 30 kV herstellen.

Bei Metallschichtwiderständen wird mit Hilfe der Metallzerstäubung auf die Oberfläche des Isolierkörpers eine hauchdünne Metallschicht aufgetragen. Zum Schutz gegen Beschädigung, Oxydation und klimatische Einflüsse werden sie entweder

mit einer Lackschicht oder Kunststoffumhüllung versehen oder in einer Kunststoffumhüllung mit Gießharz vergossen oder auch in ein Keramikrohr eingelötet. Infolge eines sehr geringen TK und großer Stabilität und Konstanz der elektrischen Werte finden sie vorwiegend als Genauigkeitswiderstände Verwendung.

2. Die Belastbarkeit der Schichtwiderstände

Kohleschichtwiderstände dürfen nach DIN 41 400 im Dauerbetrieb mit Nennlast N_n waagerecht frei aufgehängt am wärmsten Punkt eine Oberflächentemperatur von $\vartheta_{max} = 110^\circ$ C, bezogen auf eine Raumtemperatur $\vartheta_0 = 20^\circ$ C, nicht überschreiten. Die spezifische Belastung ist dann für

$$\vartheta_{max} = 110^\circ\,\text{C} \quad N'_s = 0{,}16\ \text{W/cm}^2 \text{ für } \vartheta_{max} - \vartheta_0 = 90^\circ\,\text{C}$$

Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß gewendelte Schichtwiderstände gleicher Längen- und Durchmessermaße, aber verschiedener Ohmwerte unterschiedliche Belastbarkeit besitzen. Der Grund ist die mit dem Widerstandswert veränderliche Wendelbreite und -steigung. Während bei niedrigen Ohmwerten Wendelbreite und -steigung groß werden, sind beide bei hohen Ohmwerten gering. Der gewendelte Widerstandsstreifen besitzt daher in der Abwicklung bei kleinen Ohmwerten je Längeneinheit eine große, dagegen bei hohen Ohmwerten eine kleine Wärmeabstrahlungsoberfläche.

Schichtwiderstände sind mit ihren Hauptbaumaßen und Anschlußarten (Draht-, Fahnen- oder Schellenanschluß) in folgenden Nennleistungswerten genormt worden: 0,05 W (DIN 41 398), 0,1 W (DIN 41 399), 0,25 W (DIN 41 401), 0,5 W (DIN 41 402 und DIN 41 425 mit axialem Drahtanschluß), 1 W (DIN 41 403), 2 W (DIN 41 404 und DIN 41 424 mit axialem Drahtanschluß), 3 W (DIN 41 405), 6 W (DIN 41 406), 10 W (DIN 41 407), 20 W (DIN 41 408).

Handelsüblich sind weiterhin noch Kolloid- und Kristallkohle-Schichtwiderstände mit einer Nennleistung von 0,02 W und Kristallkohle-Schichtwiderstände mit Nennleistungen von 30, 60, 100, 200 und 300 W, die jedoch nicht unter die Vorschrift der DIN 41 400 fallen. Bei höherer Umgebungstemperatur als $\vartheta_0 = 20^\circ$ C steigt die Oberflächentemperatur der Widerstände in gleichem Maße wie die Umgebungstemperatur, und es ist bei

Überschreiten der höchstzulässigen Raumtemperatur auch hier notwendig, die Widerstände durch verstärkte Luftzirkulation zu kühlen oder ihre Belastung zu senken (s. Deratingkurven in Bild 1).

Die am Widerstand liegende Spannung ist nicht nur durch die Belastung und eine hierdurch bedingte Erwärmung, sondern auch durch das Spannungsgefälle zwischen den einzelnen Wendeln begrenzt. Mit Rücksicht hierauf sind folgende zulässigen Spannungswerte U_{zmax} in Abhängigkeit von $N_n = N_z$ festgelegt worden:

$N_n = N_z$ [W]	0,05	0,1	0,25	0,5	1	2	3	6	10	20	30	60	100	200	300
U_{zmax} [$V_{\sim eff}$][1])	250	500		750 / 350[2])	750	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000			9000

[1]) Die Nennlast N_n des Widerstandes darf nicht überschritten werden. [2]) DIN 41 425.

Diese Höchstspannungswerte sollen einen Spannungsüberschlag, insbesondere bei gewendelten Schichtwiderständen, zwischen den Windungen der Widerstandswendel über den Rillenzwischenraum hinweg vermeiden, da er zur Zerstörung des Widerstandes führen würde. Ist nämlich der Spannungsabfall an der Länge der Widerstandsschicht zu hoch, so entstehen zunächst über die trennende Isolationsschicht hinweg Kriechströme und später, wenn hierdurch genügend Schichtteilchen in den Rillenzwischenraum transportiert sind, durch leitende Kohlewege und Funken ein Überschlag. Schon vor der Zerstörung des Widerstandes sinkt hierdurch sein Gesamtwiderstand und steigt im gleichen Maße der Strom, so daß schließlich der Widerstand auch durch Überlastung zerstört wird. Hochspannungswiderstände mit Kolloidkohleschicht werden daher auch mit besonders breiten und tiefen Schliffrillen versehen und erhalten so viele Wendeln, daß der Spannungsabfall zwischen den Wendeln eine bestimmte Sicherheitsgrenze nicht überschreitet. Eine besondere Lackierung trägt außerdem hier zur Erhöhung der Spannungsfestigkeit bei. Für Hochohmwiderstände mit Kolloidkohleschicht gelten folgende höchstzulässigen Betriebs-Dauerspannungswerte U_{zmax} in Abhängigkeit von der Nennleistung $N_n = N_z$:

$N_n = N_z$:	0,02	0,04	0,05	0,1	0,25	0,5	1	W
U_{zmax}:	100	200	250	500	500	1000	1500	V

Auch bei diesen Widerständen darf die Nennlast durch die angelegte Spannung nicht überschritten werden. Eine Kontrollmöglichkeit bietet Gleichung (8 b).

Widerstände der Klasse 0,5 dürfen aus Gründen der Konstanz des Widerstandswertes nur mit halber Nennlast belastet werden. Werden nämlich Widerstände in bestimmten kritischen Schaltungen, ferner zu Vergleichszwecken und in Meßgeräten verwendet, so erhält die Forderung, mit der Betriebslast möglichst weit unter der Nennlast zu bleiben, d. h. den Widerstand leistungsmäßig stark überzudimensionieren, besondere Bedeutung. Hierdurch wird nämlich die mit der Betriebszeit eintretende Abweichung durch Belastung vermieden, und es wirken sich nur die Auslieferungstoleranz und der unvermeidliche, aber mit der Belastung ebenfalls verringerte TK auf den Widerstandswert aus.

Metallschichtwiderstände sollen im Dauerbetrieb mit Nennlast $N_n = N_z$ eine Oberflächentemperatur $\vartheta_{max} = 150^0$ C, bezogen auf eine Umgebungstemperatur von $\vartheta_0 = 70...100^0$ C, nicht überschreiten. Ihre höchstzulässigen Dauerbetriebsspannungen sind für

$N_n = N_z$:	0,125	0,25	0,5	1	2	W
U_{zmax}:	250	300	350	500	750	V

3. Die Genauigkeit der Schichtwiderstände

Ihren technischen Eigenschaften entsprechend werden Schichtwiderstände nach DIN 41 400 in 4 Güteklassen eingeteilt, und zwar 0,5, 2, 5 und 7, mit folgenden Anwendungsgebieten:

Güteklasse 0.5:	für den Einbau in Meßinstrumente und Meßgeräte,
Güteklasse 2:	für gesteigerte Anforderungen und Verwendung in kommerziellen Geräten,
Güteklasse 5 u. 7:	für Radio-, UKW- und Fernsehgeräte, für Elektronik und normalen Industriegebrauch.

Wie bei den Drahtwiderständen entspricht auch hier die Klassenbezeichnung der zulässigen Widerstandsänderung in % durch Lagerung und Belastung. In Abhängigkeit von der Klasse sind in DIN 41 400 für die Bezugstemperatur $\vartheta_0 = 20^0$ C folgende Prüf- und Gütewerte festgelegt worden:

		Klasse			
		0,5	2	5	7
Toleranz (Auslieferungstoleranz, Abweichung vom Nennwert) in %	normal:	± 1	± 5 ± 2	± 10	± 10
	eingeengt:	—	± 1	± 5	± 5
Ausnahme DIN 41 398 in %	normal:	—	—	± 20	± 20
	eingeengt:	—	—	± 10	± 10
Temperaturbeiwert $\alpha \cdot 10^3$ °C^{-1}					
a) bis 1 MΩ (für jede Temperatur zw. −50° und +100° C)		0... −0,5	0... −1	0... −1	0... −1,5
b) über 1 MΩ (Mittelwert zwischen −50° und +100° C)		0... −0,5	0... −1,5	0... −1,5	0... −2
zulässige Widerstandsänderung in % vom Istwert					
a) nach Lagerung unbelastet 5000 h bei ϑ_0 = 20° C ± 5° und höchstens 60 % relativer Luftfeuchte		± 0,1	insgesamt ± 2	± 5	± 7
b) nach Belastung mit N_n, Klasse 0,5 mit $N_n/2$, 5000 h waagerecht frei aufgehängt bei ϑ_0 = 20° C ± 5°		± 0,4			
c) nach Stoßbelastung mit der 25-fachen, Klasse 0,5 mit der 12,5-fachen N_n, waagerecht frei aufgehängt 10 000 mal 1 s mit Abkühlungspausen von je 25 s unbelastet		± 0,25	± 0,25	± 0,5	± 1
d) nach Oberlastung mit der 2fachen, Klasse 0,5 mit der 1fachen N_n, waagerecht-frei aufaufgehängt 10 000 mal 1 min mit Abkühlungspausen von je 1 min unbelastet		± 0,25	± 0,25	± 0,5	± 1
e) nach Feuchtebeanspruchung					
1. vorübergehend nach 1 Beanspruchung		± 2	± 5	± 5	± 10
2. bleibend nach 10 Wechseln		± 1	± 1	± 1	± 2
Eigengeräusch (Effektivwert) µV/V		1	1	3	4

Neben der Lagerungs- und Belastungstoleranz unterscheiden sich die Klassen auch noch in der Auslieferungstoleranz. Entscheidend für den Einsatz ist aber stets die Qualität der Widerstände. So ist es z. B. denkbar, daß Schichtwiderstände der Klasse 0,5 mit größerer Auslieferungstoleranz (± 5 %) Verwendung finden können, es aber in erster Linie auf zeitliche Konstanz (± 0,5 %), geringe Änderung durch Feuchtebeanspruchung (± 2 %) und Rauschfreiheit (1 µV/V) ankommt. Verkehrt wäre es daher, in diesem Falle Widerstände der Klasse 2 oder 5 eingeengt zu fordern, nur weil normenmäßig die zulässige Auslieferungstoleranz ± 5 % betragen darf.

Schichtwiderstände mit kristalliner Schicht gehören zu den Klassen 0,5 und 2 und erfüllen auch ohne Schwierigkeiten die Anforderungen der Klasse 5. In der Klasse 0,5 ist jedoch im allgemeinen eine zusätzliche Sortierung der Chargen nach dem TK erforderlich. Widerstände mit kolloidaler Kohleschicht rechnen dagegen zur Klasse 7. Sie sind für normale Rundfunkzwecke durchaus brauchbar, scheiden aber aus, sobald hohe zeitliche Konstanz des Widerstandswertes, hohe Überlastbarkeit, hohe Rauschfreiheit und Beständigkeit gegen klimatische Einflüsse, insbesondere Tropenverwendbarkeit gefordert wird. Die Gründe liegen in dem unterschiedlichen Verhalten beider Widerstände bei Wärme- und Feuchtigkeitseinfluß. Die homogene und sehr harte kristalline Schicht besitzt im nieder- und im hochohmigen Bereich bis etwa 20 MΩ große Stabilität, hohe Belastbarkeit und geringes Eigenrauschen. Bei kolloidalen Schichten ist dagegen die Wärmebeanspruchung in hohem Maße von der Herstellungstemperatur abhängig. Je größer nämlich der Unterschied zwischen Herstellungs- und Betriebstemperatur ist, um so geringer ist auch der Einfluß der Belastungswärme auf den Widerstandswert. Darüber hinaus sind kolloidale Schichten infolge ihrer organischen Natur empfindlicher gegen Feuchtigkeit und Austrocknung. Bei Feuchtigkeit quillt die Schicht und steigt der Widerstandswert, bei Austrocknung dagegen schrumpft sie und der Widerstandswert sinkt. Für Vergleichs- und Meßzwecke sind sie daher nicht verwendbar, obwohl sich ihr TK durch Wahl geeigneter Stoffkomponenten weitgehend beeinflussen ließe. Andererseits ist es gelungen, Präzisionswiderstände mit Kristallkohleschicht im Bereich 50 Ω bis 3 MΩ (0,1...0,3 W) mit Auslieferungstoleranzen

von ± 0,3...± 0,2 % und im Bereich 50 Ω...1 MΩ sogar mit einer Auslieferungstoleranz von ± 0,1 % herzustellen. Im Hinblick auf diese unterschiedlichen Eigenschaften lassen sich Schichtwiderstände etwa auf folgende Ausführungsarten abgrenzen:

Kristallkohle-Schichtwiderstände:

1. Kleinstwiderstände 0,02 W...0,5 W (10 Ω...3 MΩ)
2. Genauigkeitswiderstände Klasse 0,5 und besser (0,05 W...1 W, 100 Ω...10 MΩ)
3. Hochbelastbare Widerstände (auch induktionsarm) 1 W...300 W (100 Ω...10 MΩ)

Kolloidkohle-Schichtwiderstände:

1. Hoch- und Höchstohmwiderstände 100 kΩ...1 TΩ (0,02 W...1 W)
2. Höchstspannungswiderstände 5 kV...30 kV (10 MΩ...100 GΩ, 0,5 W...4 W)

Metall-Schichtwiderstände

Genauigkeitswiderstände mit hoher und höchster Konstanz und Stabilität (10 Ω...1 MΩ, 0,05 W...2 W).

Der TK von kristallinen Kohleschichten ist um so kleiner, je dicker die Schicht ist. Die Ursache liegt darin, daß Kohlenstoff-Einkristalle wie Metall einen positiven TK besitzen, der aber stets durch den negativen TK der interkristallinen Berührungsschichten überdeckt wird. Die größeren Kohlenstoffkristalle in dickeren Schichten tragen dann mit ihrem positiven TK in stärkerem Maße zur Kompensierung des vorherrschenden negativen TK bei. Bis zu Widerstandswerten von etwa 100 kΩ ist der Einfluß der Kohlenstoffkristalle noch merklich, so daß $\alpha = -0{,}2 \ldots -0{,}3 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$. Darüber hinaus steigt der TK mit steigendem Widerstandswert und geringer werdender Belastung, wie folgende Abhängigkeit des TK α von N_n und R zeigt:

N_n [W] :	0,1	1	6	10
R [MΩ]				
1 :	−0,50	−0,33	−0,27	$-0{,}25 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$
10 :	—	−0,80	−0,43	$-0{,}37 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$
20 :	—	−1,05	−0,55	$-0{,}45 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$

Wenn auch der TK von Kolloidkohleschichten durch entsprechende Wahl der Stoffkomponenten in verhältnismäßig weiten Grenzen beeinflußbar und auch bei sonst gleichem Herstellungsverfahren nicht in so starkem Maße vom Widerstandswert abhängig ist, so besteht doch bei so hohen Widerstandswerten einsatzmäßig keine Notwendigkeit für eine engere Tolerierung. Vielmehr kann man sich hier mit der Auslieferungstoleranz begnügen. Sie beträgt für den Bereich 100 kΩ...100 MΩ ± 10 %, 100 kΩ...10 GΩ ± 20 % und > 3 MΩ...100 GΩ ± 30 %.

Für Hochspannungs-Kolloidkohle-Schichtwiderstände mit Spannungen bis 30 kV ist der Spannungskoeffizient von Bedeutung, der ein Maß für die Abhängigkeit des Widerstandswertes von der anliegenden Spannung ist und die Widerstandsänderung in %/V angibt. Im Bereich 0...200 V ist jedoch der Spannungskoeffizient selbst stark spannungsabhängig. Die Auswertung des Spannungskoeffizienten muß sich deshalb auf den Spannungsbereich beschränken, in dem er gemessen wurde. Oberhalb eines bestimmten Anlaufbereiches ändert sich der Wert dieser Hochspannungswiderstände bei weiter zunehmender Spannung nur noch unwesentlich. Deshalb wird ihr Widerstandswert auch stets mit einer Meßspannung ermittelt, die über diesem Anlaufgebiet liegt und eine Einhaltung der Auslieferungstoleranz gewährleistet.

Der TK von Metallschichten ist mit $\alpha = \pm 0{,}025 \ldots \pm 0{,}1 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$ und im extremen Falle mit $\alpha = \pm 0{,}015 \cdot 10^{-3}\,°C^{-1}$ sehr gering. Auch die übrigen Prüf- und Gütewerte sind etwa um 50% kleiner als die der Klasse 0,5 nach DIN 41400. Widerstände dieser Art sind daher für Schaltungen geeignet, in denen nicht nur höchste zeitliche Konstanz des Widerstandswertes, sondern auch sehr hohe Stabilität bei wechselnden Betriebstemperaturen gefordert wird. Auch die Auslieferungstoleranzen liegen bei ihnen mit Werten von ± 0,5 %, ± 0,2 % und ± 0,1 % unter den Werten der Klasse 0,5. Ihre hohen Genauigkeitswerte geben im extremen Falle sogar die Möglichkeit, sie als Meßnormalien zu verwenden.

4. Verhalten der Schichtwiderstände im Hf-Kreis

Im Hochfrequenz-(Hf-)Kreis sind nur Schichtwiderstände verwendbar, da die hohen kapazitiven und induktiven Einflüsse

der Drahtwindungen die Verwendung des Drahtwiderstandes hier unmöglich machen. Hochohmwiderstände mit zylindrischer Schicht, also ungewendelt, sind praktisch induktionsfrei. Sie lassen sich jedoch nur bis zu einem Widerstandswert von 10 kΩ herstellen. Darüber hinaus wird an Stelle der normalen Wendel ein induktionsarmer Mäanderschliff, ähnlich wie in Bild 5 d für Drahtwiderstände gezeigt, verwendet. Als Kapazitäten C können in Erscheinung treten die verteilte Raumkapazität der Widerstandsschicht, die Querkapazitäten zwischen den Wendeln, die Klemmenkapazität zwischen den Anschlußarmaturen und die Streu- oder Erdkapazitäten. Bei einem Hochohmwiderstand im Hf-Kreis sind neben den bereits genannten Eigenschaften, wie kleiner TK, zeitliche Konstanz des Widerstandswertes usw., daher weiterhin noch der Wirkwiderstand R und der Phasenwinkel φ (tan φ = Verhältnis von Blindwiderstand X zu Wirkwiderstand R) von Bedeutung. Größere Bedeutung als φ besitzt im allgemeinen R. R soll nämlich eine möglichst große Frequenzunabhängigkeit besitzen. Bei entsprechend hohen Frequenzen beginnt jedoch R abzunehmen, und es ist notwendig zu wissen, welchen Wirkwiderstand R ein bestimmter Widerstand mit dem Gleichstromnennwert R_{gl} bei einer gegebenen Frequenz f noch besitzt oder bei welcher Grenzfrequenz f_{gr} dieser Widerstand noch verwendbar ist, ohne einen zulässigen Wirkwiderstandsabfall zu überschreiten. Zu diesem Zweck betrachtet man den Widerstand als Leitungsstück mit Verlusten, und zwar mit stetig verteiltem Widerstand R, mit Ableitung G, mit Induktivität L und mit Kapazität C. Ist dieser Widerstand ungewendelt oder mit Mäanderschliff versehen, so kann die Selbstinduktivität L und damit der induktive Widerstand ωL gegenüber dem reellen Wert R und ebenso auch die Ableitung G gegenüber dem kapazitiven Leitwert ωC als verschwindend klein vernachlässigt werden. Damit ist der Phasenwinkel φ kapazitiv (Spannung dem Strom in der Phase nacheilend), und es sind die Gleichungen der Leitungstheorie in vereinfachter Form anwendbar. Eine Erhöhung des Widerstandswertes R durch Haut- oder Skineffekt (Stromverdrängung bei hohen Frequenzen) tritt nicht ein, da noch bei Frequenzen von einigen GHz die Eindringtiefe des Hf-Stromes die Dicke der Kohleschicht wesentlich überschreitet. Sie beträgt bei f = 1 GHz noch 0,1 mm.

Setzt man für den kapazitiven Widerstand

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f_{[MHz]} \cdot C_{[pF]}} \quad [\Omega]$$

so sind für die Ermittlung von R, tan φ und f_{gr} folgende zwei Frequenzgebiete zu unterscheiden:

1. Gültig für Frequenzen f, bei denen $R_{gl}/R_c < 18$ und das Dämpfungsmaß $a < 3$ N:

$$R = \frac{R_{gl}}{1 + 0{,}02 \cdot (R_{gl}/R_c)^2} \quad [\Omega] \tag{15}$$

$$X = 3 \cdot R_c \quad [\Omega] \tag{16}$$

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} = \frac{3 + 0{,}06 \cdot (R_{gl}/R_c)^2}{R_{gl}/R_c} \tag{17}$$

Soll der Wirkwiderstandsabfall 5 % von R_{gl} nicht überschreiten, d. i. $R/R_{gl} = 0{,}95$, so ist

$$\frac{R}{R_{gl}} = \frac{1}{1 + 0{,}02 \cdot (R_{gl}/R_c)^2} = 0{,}95$$

und damit für diese Bedingung die Grenzfrequenz

$$f_{gr} = \frac{0{,}24}{C_{[pF]} \cdot R_{gl\,[M\Omega]}} \quad [MHz]$$

und der Grenzwirkwiderstand

$$R_{gr} = \frac{0{,}24}{C_{[pF]} \cdot f_{[MHz]}} \quad [M\Omega]$$

2. Gültig für Frequenzen f, bei denen $R_{gl}/R_c \geq 18$ und das Dämpfungsmaß $a \geq 3$ N:

$$R = X = \sqrt{0{,}5 \cdot R_{gl} \cdot R_c} \quad [\Omega] \tag{18}$$

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} = 1; \quad \varphi = 45°$$

$$a = \sqrt{0{,}5 \cdot R_{gl}/R_c} \geq 3 \text{ N} \tag{19}$$

Das Frequenzgebiet, bei dem der R-Verlauf von 1 in 2 übergeht, ist

$$f' = \frac{0{,}31 \cdot a^2}{C_{[pF]} \cdot R_{gl\,[M\Omega]}} \quad [MHz] \qquad (20)$$

Bis zu Frequenzen, bei denen $R_{gl}/R_c < 18$, ist $R > 13{,}4\,\%$ von R_{gl}. Im Falle $R_{gl} = R_c$ ist $R = 98\,\%$ von R_{gl}. Bei $R_{gl}/R_c = 18$ ergeben die Gleichungen (15) und (18) etwa gleiche Resultate. Gleichung (18) ist anzuwenden, sobald das Dämpfungsmaß der Gleichung (19) $a \geq 3$ N. Im Bereich höherer Frequenzen, bei denen $R_{gl}/R_c > 18$, nimmt R mit $1/\sqrt{f}$ ab, da in Gleichung (18) für einen bestimmten Widerstand alle übrigen Werte konstant sind.

Die Größe der Eigenkapazität C von Schichtwiderständen wächst mit ihrer Belastungsmöglichkeit und kann vergleichsweise folgender Aufstellung entnommen werden, in der die erste Reihe C-Werte von Schichtwiderständen mit Kappen und axialem Drahtanschluß und die zweite Reihe C-Werte von Schichtwiderständen nur mit axialem Drahtanschluß (beide jedoch fabrikatbedingt) enthält:

N_n:	0,03	0,05	0,1	0,25	0,5	1	2	3	W
C:	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	1,0	1,2	1,6	pF
C:	—	—	—	0,5	0,75	1,0	1,5	—	pF

Für Widerstände mit $N_n = 0{,}25 \ldots 3$ W kann nach DIN 41 400 der Widerstandskörper als Vollkörper oder als Rohr ausgebildet sein. Für Widerstände in KW- oder UKW-Kreisen kommen dagegen nur Vollkörper in Betracht. Beim Bekohlungsvorgang wird nicht nur der Außenmantel, sondern auch das Innere des Rohres zwangsläufig mit einer Kohleschicht versehen. Bei ungewendelten Widerständen macht man hiervon Gebrauch, um die Belastbarkeit des Widerstandes zu erhöhen. Bei Widerständen in KW- oder UKW-Kreisen ist dagegen die Innenschicht unerwünscht auch dann, wenn durch Abschleifen der Stirnseiten des Trägrohres die galvanische Verbindung zwischen Außen- und Innenschicht aufgehoben ist, weil sie als kapazitiver Nebenschluß wirksam werden würde.

Beispiel 12: a) Es sind der Hf-Wirkwiderstand R, der Phasenwinkel φ und die Grenzfrequenz f_{gr} für einen Hochohmwiderstand mit den Werten $R_{gl} = 0{,}1$ MΩ $= 10^5$ Ω und C = 0,2 pF bei einer Frequenz $f = 10$ MHz festzustellen.

Zunächst errechnet sich der kapazitive Widerstand aus

$$R_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 0{,}2} = 7{,}95 \cdot 10^4\ \Omega$$

Damit wird das Verhältnis

$$\frac{R_{gl}}{R_c} = \frac{10^5}{7{,}95 \cdot 10^4} = \frac{1{,}26}{1}$$

und es ist das Rechenverfahren 1 anzuwenden, nämlich

$$R = \frac{R_{gl}}{1 + 0{,}02 \cdot (R_{gl}/R_c)^2} = \frac{10^5}{1 + 0{,}02 \cdot 1{,}26^2} = 0{,}97 \cdot 10^5\ \Omega$$

d. h. es ist $R = 97\ \%$ von R_{gl}.

Weiterhin ist

$$X = 3 \cdot R_c = 3 \cdot 7{,}95 \cdot 10^4 = 2{,}38 \cdot 10^5\ \Omega$$

$$\tan \varphi = \frac{X}{R} = \frac{2{,}38 \cdot 10^5}{0{,}97 \cdot 10^5} = 2{,}454;\ \varphi = 67^\circ 50'$$

Die Grenzfrequenz, bei der ein Wirkwiderstandsabfall von 5 % eintritt, ist

$$f_{gr} = \frac{0{,}24}{C \cdot R_{gl}} = \frac{0{,}24}{0{,}2 \cdot 0{,}1} = 12\ \text{MHz}$$

b) Es sind der Hf-Wirkwiderstand R, das Dämpfungsmaß a und die Übergangsfrequenz f' für einen Hochohmwiderstand mit den Werten $R = 1\ M\Omega = 10^6\ \Omega$ und $C = 0{,}32$ pF bei einer Frequenz $f = 10$ MHz zu berechnen.

Zunächst ist wieder der kapazitive Widerstand

$$R_c = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 10 \cdot 0{,}32} = 5 \cdot 10^4\ \Omega$$

Damit ist das Verhältnis

$$\frac{R_{gl}}{R_c} = \frac{10^6}{5 \cdot 10^4} = \frac{20}{1}$$

und das Verfahren 2 anzuwenden, so daß

$$R = X = \sqrt{0{,}5 \cdot R_{gl} \cdot R_c} = \sqrt{0{,}5 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^4} = 0{,}16 \cdot 10^6\ \Omega$$

d. h. es ist $R = 16\ \%$ von R_{gl}.

Das Dämpfungsmaß ist

$$a = \sqrt{0{,}5 \cdot R_{gl}/R_c} = \sqrt{0{,}5 \cdot 20} = 3{,}16\ N$$

Die Übergangsfrequenz ist schließlich

$$f' = \frac{0{,}31 \cdot a^2}{C \cdot R_{gl}} = \frac{0{,}31 \cdot 3{,}16^2}{0{,}32 \cdot 1} = 9{,}7\ MHz$$

Der bei Widerständen mit normalen Abmessungen im allgemeinen nicht mehr unterschreitbare Wert von C = 0,2 pF entspricht bei f = 100 MHz einem R_c = 10 kΩ. Ließe sich C = 0,2 pF auch bei Einbau des Widerstandes in ein Gerät einhalten, wo sich C jedoch durch die Streu- oder Erdkapazität meist vergrößert, so betrüge die Wirkwiderstandsverminderung durch C bei Widerständen mit $R_{gl} \leqq 10$ kΩ und einer Frequenz f = 100 MHz nicht mehr als 2 %. Hieraus ist ersichtlich, daß R über einen um so größeren Frequenzbereich konstant bleibt und damit mit dem Gleichstromwiderstand R_{gl} übereinstimmt, je kleiner C ist, d. h. je kleiner die Abmessungen des Widerstandes sind. Als Widerstände mit besonders kleiner Eigenkapazität sind daher auch solche mit den Abmessungen 1,6 mm Durchmesser und 5 mm Länge (100 Ω...100 kΩ, 0,02 W) geschaffen worden, deren Eigenkapazität nur noch C = 0,1 pF beträgt. Bei einem R_{gl} = 10 kΩ und f = 100 MHz beträgt dann der Wirkwiderstandsabfall nur 0,7 %. Dieser Verkleinerungstendenz wird jedoch durch den notwendigen Leistungsverbrauch und die hierfür notwendige Wärmeabstrahlungsoberfläche eine Grenze gesetzt.

Bei gewendelten Widerständen, die vorzugsweise für höhere Widerstandswerte ($R_{gl} > 10$ kΩ) hergestellt werden, sind folgende Baugrundsätze zu berücksichtigen, um die Querkapazitäten zwischen den Wendeln, auch bei Mäanderschliff, möglichst gering zu halten:

1. kleiner Wendeldurchmesser (entsprechend einer Verkleinerung der Kondensatorfläche F gemäß der allgemeinen Kondensatorgleichung

$$C = \frac{\varepsilon \cdot F}{4 \cdot \pi \cdot a}$$

2. große Wendelabstände (entsprechend einer Vergrößerung der Stärke a des Dielektrikums in der gleichen Kondensatorgleichung für C)

3. große Wendelzahl oder geringe Wendelsteigung (entsprechend einer Kapazitätsverringerung durch verstärkte Serienschaltung $1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \ldots$).

Die Raumkapazitäten der Widerstandsschicht unterscheiden sich dagegen bei den einzelnen Widerstandsausführungsarten nur wenig.

Es besteht auch die Möglichkeit, die Induktivität eines normal gewendelten Widerstandes mit seinen stets vorhandenen Eigenkapazitäten zu kompensieren. In diesem Falle wird die induktive Phasendrehung durch Einschleifen einer bestimmten Wendelzahl so eingestellt, daß sich die induktive und die kapazitive Phasendrehung im geforderten Frequenzbereich annähernd aufheben.

Bei kleinen Werten für L und C wird der Phasenwinkel

$$\tan \varphi = \omega \cdot \left(\frac{L}{R} - R \cdot C \right)$$

Der Klammerausdruck in dieser Gleichung hat die Dimension einer Zeit und wird daher wirksame Zeitkonstante des Widerstandes genannt. Bei kleineren Werten von R überwiegt die Wirkung von L (φ positiv) und bei großen Werten von R die Wirkung von C (φ negativ). Bei der Bedingung

$$\frac{L}{C} = R^2 \text{ und } R = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

heben sich beide Wirkungen auf, so daß φ in weitem Frequenzbereich Null wird (winkelfreier Widerstand).

Im Gegensatz zu ungewendelten Widerständen, bei denen dielektrische Verluste im Trägermaterial und Schutzlacküberzug mit ihrem Einfluß auf R vernachlässigt werden können, da R_{gl} den Wert von 10 kΩ im allgemeinen nicht übersteigt und die beiden dem Gleichstromwiderstand parallel geschalteten Verlustwiderstände auch bei hohen Frequenzen noch nicht in die Größenordnung von R_{gl} oder R kommen, ist das bei gewendelten Hochohmwiderständen mit höheren Widerstandswerten nicht möglich. Nimmt man für einen keramischen Widerstandsträger und die Schutzlackschicht einen mittleren Verlustfaktor bei 100 MHz von $\tan \delta = 1 \cdot 10^{-3}$ und für die Eigenkapa-

zität 2 pF an, so ergibt dies einen parallel geschalteten Verlustwiderstand von

$$\frac{1}{\omega \cdot C \cdot \tan \delta} = \frac{10^{12}}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot 10^{6} \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 800\ \text{k}\Omega$$

der sich bei Wirkwiderständen $R \geq 50$ kΩ bereits bemerkbar macht.

5. Das Eigengeräusch der Schichtwiderstände

Das Eigengeräusch der Widerstände setzt sich im wesentlichen aus folgenden sich überdeckenden Erscheinungen zusammen:

1. Stromrauschen,
2. Wärmerauschen und
3. Kontaktrauschen.

Der Strom setzt sich atomistisch in Feldrichtung aus einzelnen, durch den Übergang der einzelnen Elektronen als Ladungsträger (Elementarladung eines Elektrons $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ As) bedingten Stromstößen zusammen (vgl. den Schroteffekt bei Röhren), die infolge geringer mittlerer Fortschreitungsgeschwindigkeit verhältnismäßig lang sind, einander weit überschneiden und nur geringe Höhe besitzen. Dieser Ungleichförmigkeit im Stromfluß überlagert sich die mittelbar von den Ionen durch Temperatureinfluß auf die Leitungselektronen übertragene Wärmebewegung mit dem Erfolg, daß die zeitliche Aufeinanderfolge der einzelnen Stromstöße unregelmäßigen Schwankungen unterliegt.

Die wesentlichste Ursache für das Eigenrauschen ist jedoch die Wärmebewegung der Ionen selbst. Während nämlich in elektrischen Leitern elektrische Ströme dadurch zustande kommen, daß unter dem Einfluß von elektrischen Feldern elektrische Ladungen bewegt werden, entstehen umgekehrt Schwankungen des elektrischen Feldes, d. s. elektromotorische Kräfte (Wärmerauschspannungen), wenn elektrische Ladungen mit ihren Trägern (Ionen = positiv oder negativ geladene Atome) Brownsche Wärmebewegungen ausführen.

Bei Kohleschichtwiderständen insbesondere entstehen noch Eigengeräusche durch einen ungleichmäßigen Stromübergang zwischen den kleinsten leitenden Teilchen und hiermit verbundene Polarisationserscheinungen (Kontaktrauschen).

Die durch Wärmeeinfluß bedingte Rauschleistung ist nach Nyquist

$$N_r = I_r^2 \cdot R = \frac{U_r^2}{R} = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \quad [W] \qquad (21)$$

Hierin bedeuten außer den bereits bekannten Formelzeichen

$k = 1{,}37 \cdot 10^{-23}$ = Boltzmannsche Konstante in Ws/° K

$T = 273 + \vartheta$ = absolute Temperatur des Widerstandes in ° K

Δf = der vom Verstärker hindurchgelassene Frequenzbereich in Hz.

Gleichung (21) zeigt, daß die Intensität der Schwankung mit der thermischen Energie $k \cdot T$ nach dem Gleichverteilungsgesetz der mechanischen Wärmetheorie zusammenhängt und mit der Frequenzbandbreite Δf wächst, im übrigen aber unabhängig von der Lage des Frequenzbereiches ist. Ein solcher Wechselstrom aber, in dem alle Frequenzen gleichmäßig stark vertreten sind, gibt nach ausreichender Verstärkung ein „Rauschen", in dem alle Frequenzen kleinerer Amplitude, ganz gleich welcher Frequenz, untergehen (Rauschpegel).

Aus Gleichung (21) ergeben sich der Rauschstrom und die Rauschspannung

$$I_r = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R}} \quad [A] \qquad (22)$$

$$U_r = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f \cdot R} \quad [V] \qquad (23)$$

Die Rauschleistung N_r wird durch eine Rauschspannung U_r erzeugt, die dem nutzbaren Verstärkungsgrad von Verstärkern eine physikalische Grenze setzt.

Beispiel 13: Es ist die Wärmerauschspannung U_r eines Widerstandes $R = 1\ M\Omega$ im Frequenzbereich $\Delta f = 10^4$ Hz und bei einer Temperatur $\vartheta = 30°$ C ($T = 273 + \vartheta = 303°$ K) zu ermitteln.

Die Rauschleistung ist nach Gleichung (21)

$$N_r = 4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f = 4 \cdot 1{,}37 \cdot 10^{-23} \cdot 303 \cdot 10^4 = 1{,}66 \cdot 10^{-16}\ W$$

und damit die Rauschspannung nach Gleichung (23)

$$U_r = \sqrt{N_r \cdot R} = \sqrt{1{,}66 \cdot 10^{-16} \cdot 10^6} = 1{,}3 \cdot 10^{-5}\ V = 13\ \mu V$$

Das Stromrauschen steht in einem bestimmten Verhältnis zu der am Widerstand liegenden Spannung, nimmt mit steigender

Frequenz ab und wird oberhalb des Tonfrequenzspektrums bald bedeutungslos.

Da die Rauschspannung einerseits mit der angelegten Gleichspannung, andererseits mit der Rauschfrequenz durch eine nicht sicher bekannte Funktion höherer Ordnung verbunden ist, so lassen sich Rauschspannungsangaben in µV/V nur dann vergleichen, wenn sie mit gleichartigen Meßanordnungen gemessen werden. Aus diesem Grunde ist in DIN 41 400 eine einheitliche Meßanordnung und Meßanweisung festgelegt worden. Als Verstärker wird hierbei ein Gerät mit einer frequenzunabhängigen Verstärkung im Bereich 30...10 000 Hz und mit einem gegenüber dem Probewiderstand hochohmigen Eingangswiderstand (zulässige Verstärkerabweichung ± 0,1 Neper) verlangt. Die Meßeinrichtung wird mit einer Tonfrequenz zwischen 800 und 1000 Hz geeicht.

Bei Kristallkohleschichten bleibt die mittlere Rauschspannung bis zu Widerstandswerten von etwa 10^6 Ω unter 0,5 µV/V, nimmt dann aber stark zu und erreicht bereits bei 10^7 Ω Werte von etwa 4 µV/V. Bei Kolloidkohleschichten dagegen steigt die Rauschspannung anfänglich stärker an und erreicht bei Widerstandswerten von 10^5 Ω 1 µV/V, bei 10^6 Ω etwa 2 µV/V und bei 10^7 Ω etwa 3 µV/V. Bei hohen Widerstandswerten verhält sich also in dieser Beziehung die Kolloidkohleschicht günstiger als die Kristallkohleschicht. Bei gewendelten Schichtwiderständen hat auch die Länge der abgewickelt gedachten Widerstandsschicht Einfluß auf die Höhe des Eigengeräusches, da das Eigengeräusch mit der Länge des Leitungsweges, d. i. mit der Anzahl der hintereinander angeordneten Atomgitter wächst. Bemerkenswert ist die Beobachtung, daß auch hochohmige Drahtwiderstände ein Stromrauschen zeigen.

V. Kennzeichnung fester Widerstände für die Nachrichtentechnik

1. Kennzeichnung durch Stempelaufdruck

Feste Drahtwiderstände mit Nennlast bis 50 W nach DIN 41 410, feste Schichtwiderstände mit Nennlast bis 20 W nach DIN 41 400 und feste glasierte Drahtwiderstände nach DIN

41 430 sind auf der den Anschlüssen abgekehrten Seite möglichst einzeilig mit folgenden Angaben zu kennzeichnen:

1. Widerstandswert in Ω, kΩ oder MΩ in höchstens dreistelligen Zahlen,
2. Toleranzen in % (nur bei eingeengter Toleranz oder A oder B),
3. Klasse,
4. Stromartkennzeichen (~ oder ⎓, nur DIN 41 430),
5. DIN-Verbandszeichen,
6. Hersteller- oder Firmenzeichen.

Bei kleinen Draht- und Schichtwiderständen mit N_n = 0,25 und 0,5 W können bei 1. das Ω-Zeichen und die Kennzeichen 5. und 6. und bei Schichtwiderständen mit N_n = 0,05 und 0,1 W außerdem das Kennzeichen 3. aus Platzmangel wegfallen. Bei ungeschützten Drahtwiderständen sind die Kennzeichen auf der Schelle oder Kappe anzubringen. Bei kleineren glasierten Drahtwiderständen mit N_n = 2 und 4 W können die Kennzeichen 3. bis 6. weggelassen werden. Sie erscheinen dann nur auf der Verpackung.

2. Farbkennzeichnung nach DIN 41 429

Die Farbkennzeichnung besteht aus Farbringen, die dem IEC-Farbencode entsprechen und um den Widerstand herumlaufen. In Ausnahmefällen können statt der Ringe auch Punkte, im Bedarfsfalle diese auch zweizeilig angebracht werden. Um Verwechslungen zu vermeiden, muß der erste Ring, mit dem die Kennzeichnung beginnt, deutlich erkennbar näher an dem einen Ende des Widerstandes liegen als der letzte Ring am anderen Ende. Weiterhin müssen die Ringe zur Unterscheidung genügend große Zwischenräume besitzen. Die Farbringe haben folgende Bedeutung:

1. Ring: 1. Ziffer des Widerstandswertes
2. Ring: 2. Ziffer des Widerstandswertes
3. Ring: Multiplikator, d. h. Zehnerpotenz, mit der die ersten beiden Zahlen zu multiplizieren sind
4. Ring: Auslieferungstoleranz.

Farbencode

Farbe	1. Ring 1. Ziffer	2. Ring 2. Ziffer	3. Ring Multiplikator	4. Ring Toleranz	5. Ring[1] Güteklasse
Silber	—	—	10^{-2}	± 10 %	—
Gold	—	—	10^{-1}	± 5 %	—
Schwarz	—	0	10^{0}	± 0,05 %[1]	—
Braun	1	1	10^{1}	± 1 %	—
Rot	2	2	10^{2}	± 2 %	0,5 DIN
Orange	3	3	10^{3}	—	—
Gelb	4	4	10^{4}	—	2 DIN
Grün	5	5	10^{5}	—	—
Blau	6	6	10^{6}	—	—
Violett	7	7	10^{7}	± 30 %[1]	—
Grau	8	8	10^{8}	—	—
Weiß	9	9	10^{9}	—	—
Keine	—	—	—	± 20 %	—

Kommt es vor, daß einzelne Ringe oder Punkte in der Reihenfolge fehlen oder daß sogar der Widerstand ganz einfarbig ist, so deckt sich in diesem Falle die Farbe des fehlenden Ringes oder Punktes mit der Körperfarbe.

In DIN 41 429 ist vorgesehen, daß sich der Geltungsbereich auf die Farbkennzeichnung des Widerstandswertes von festen Schichtwiderständen der Klasse 5 nach DIN 41 400 und von Drahtwiderständen der Klasse 2 nach DIN 41 410 erstreckt und daß in Abweichung von der IEC-Empfehlung die Widerstände nach DIN 41 400 mit normalen Toleranzen nicht mit einer Toleranz-Farbkennzeichnung versehen werden.

Beispiel 14:

Widerstandswert 0,1 Ω ± 20 %:

1. Ring braun: 1
2. Ring schwarz: 0
3. Ring silber: 10^{-2}

$10 \cdot 10^{-2} = 0{,}10\ \Omega$

4. Ring — ± 20 %

[1] Diese Farbkennzeichen entsprechen nicht DIN 41429, werden aber von verschiedenen deutschen Firmen angewendet.

Widerstandswert 4,7 MΩ ± 10 %:

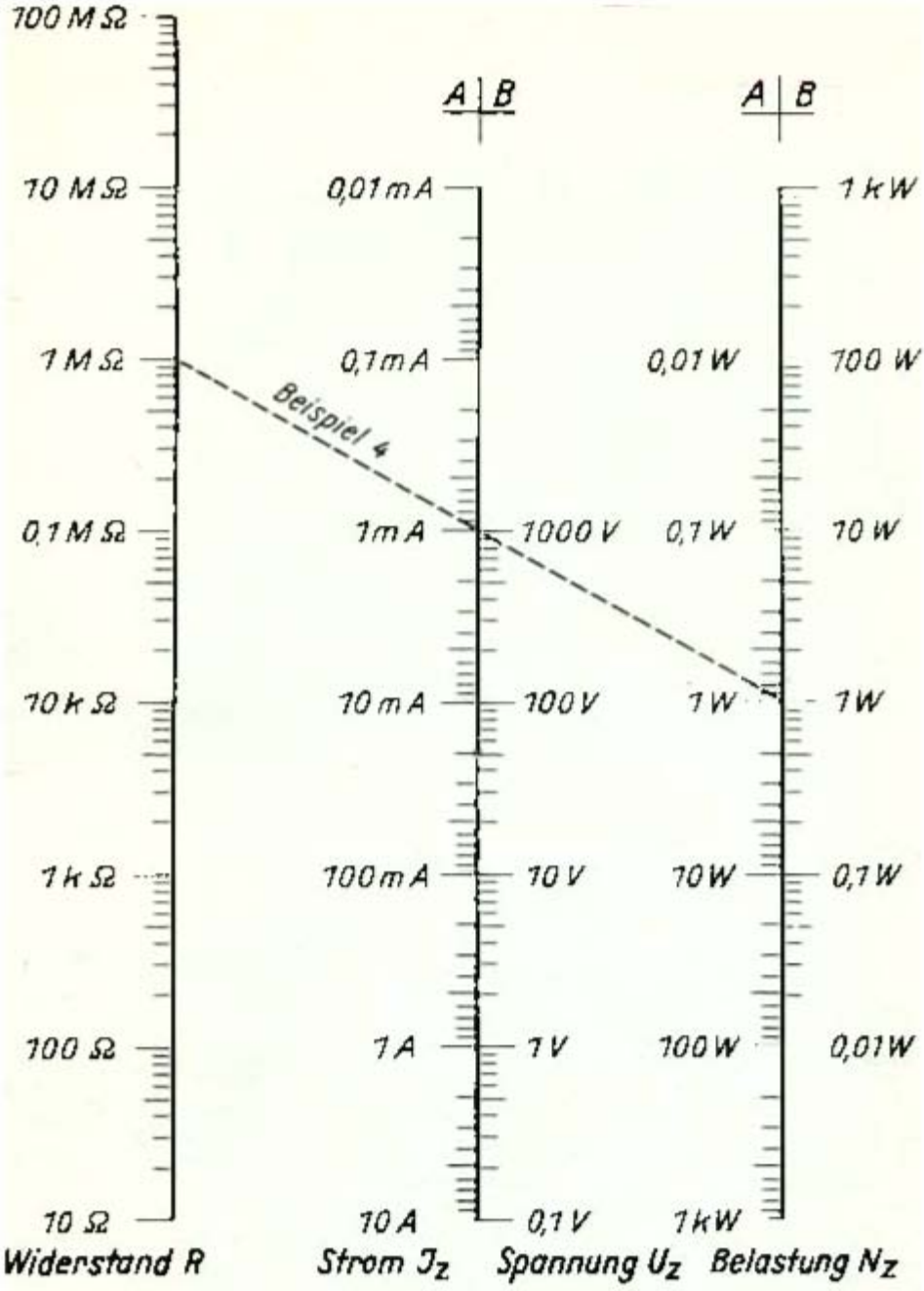
1. Ring gelb:	4	
2. Ring violett:	7	
3. Ring grün:	10^5	
	$47 \cdot 10^5 = 4{,}7 \cdot 10^6$	$= 4{,}7$ MΩ
4. Ring silber:	± 10 %	

Widerstandswert 33 kΩ:

1. Ring orange:	3	
2. Ring orange:	3	
3. Ring orange:	10^3	
	$33 \cdot 10^3$	$= 33$ kΩ

3. Zeichnungssinnbilder in Schaltplänen

Das Schaltbild eines Gerätes ist erst dann vollständig, wenn neben dem Widerstandswert auch die Belastbarkeit von Widerständen eingetragen ist. Das gilt insbesondere für Schaltbilder des Reparaturdienstes. Sie müssen jedoch oft so klein gehalten werden, daß ein Widerstand nur durch ein Rechteck von 3 mm Länge darstellbar ist und daß neben dem Widerstandswert und der Positionszahl nicht auch noch die Belastung in Zahlen angegeben werden kann. Die Industrie hilft sich daher schon seit längerem durch kleine Symbole innerhalb des Rechtecks. Jedoch sind diese Zeichen nicht einheitlich, vielmehr benutzt fast jede Firma ihre eigenen Zeichen zumindest bei den Widerständen mit weniger als 0,5 W Belastbarkeit. Der Fachnormenausschuß „Schaltzeichen", Unterabteilung „Schwachstromschaltzeichen" (FNE 108/2), im Fachnormenausschuß Elektrotechnik (FNE) des Deutschen Normenausschusses (DNA) ist jedoch z. Z. im Begriff, in einem entsprechenden Normblatt einheitliche Zeichen aufzustellen und zu veröffentlichen. Ein abschließendes Ergebnis liegt jedoch noch nicht vor.



Nomogramm 2.
Beziehung zwischen Widerstand, Strom bzw. Spannung und Belastung

radio PRAKTIKER bücherei

Leicht verständlich, aber technisch zuverlässig, inhaltreich und doch billig sind alle Bände dieser radio- und fernsehtechnischen Bücherei. Namhafte Autoren sind ihre Mitarbeiter, die sich diesem Vorhaben in der richtigen Erkenntnis zur Verfügung stellten, daß es heute mehr denn je darauf ankommt, jedem einzelnen Interessenten, vor allem auch dem Lernenden, dem Schüler, Studenten und Lehrling, den Aufbau einer kleinen radio- und fernsehtechnischen Bibliothek zu ermöglichen. Deshalb wurden Umfang, Ausstattung und Preis so aufeinander abgestimmt, daß für den aufzuwendenden niedrigen Betrag ein Optimum an Wissensstoff und Unterlagen geboten werden kann.

Ausführliches Verzeichnis gratis durch den Buchhandel

Jede Nr. 64 Seiten

mit vielen Bildern

DIE NEUESTEN BÄNDE

* Auch in Ganzleinen erhältlich.

Schwebungssummer. Nr. 78
Von *Herbert Lennartz*. Mit 42 Bildern. 2. Auflage.

Bastelpraxis, Band III. Prakt. Aufbau von einfachen Prüfgeräten und Empfängern vom Detektor bis zum Super. Nr. 79/79a *
Von *Werner W. Diefenbach*. Mit 138 Bildern. 4. u. 5. Aufl.

Das Spulenbuch (Hochfrequenzspulen). 2. u. 3. Aufl. Nr. 80/80a
Von *H. Sutaner*. Mit 78 Bildern, 14 Tab., 12 Nomogr.

Die elektrischen Grundlagen der Radiotechnik. 4. bis 6. Aufl. Nr. 81/83a *
Von Ing. *Kurt Leucht*. Mit 139 Bildern u. vielen Tabellen.

Fernsehantennen-Praxis. 5. und 6. Auflage. Nr. 84
Von *Herbert G. Mende*. Mit 38 Bildern und 7 Tabellen.

Hi-Fi-Schaltungs- und Baubuch. Nr. 85
Von Ing. *Fritz Kühne*. Mit 93 Bildern und 3 Tabellen.

Berufskunde des Radio- und Fernsehtechnikers. Nr. 86/87
Vom Lehrling zum Meister. Von Dipl.-Ing. *Georg Rose*.

Schliche und Kniffe für Radiopraktiker Teil II. Nr. 88
Erfahrungen aus Werkstatt und Labor. Von *Fritz*
Mit 57 Bildern.

Autoempfänger. Einbau, Antennen und Funkentst
Von *Eckhard-Heinz Manzke*. Mit 108 Bildern und 7

Superhet-Empfänger.
Von *H. Sutaner*. Mit 107 Bildern.

Fernsteuerschaltungen mit Transistoren für Flugm
Von *Helmut Bruß*. Mit 75 Bildern. 2. und 3. Auflag

Fotozellen und ihre Anwendung. Von *L. Beitz*
und *H. Hesselbach*. Mit 102 Bildern und 5 Tabellen

Kleines Stereo-Praktikum.
Von Ing. *Fritz Kühne* und *Karl Tetzner*. Mit 93 Bil

Wie arbeite ich mit dem Elektronenstrahl-Oszillografen? Nr. 99
Von *H. Sutaner*. Mit 87 Bildern.